La HISTORIA de la TIERRA

los primeros 4.500 millones de años
desde el polvo estelar al planeta viviente

ROBERT HAZEN

Un fascinante viaje al pasado remoto de la Tierra para conocer las condiciones que hicieron posible su existencia y los dramáticos cambios que dieron como resultado el planeta que conocemos.

Tal es la propuesta de Robert M. Hazen, distinguido geofísico y divulgador científico estadounidense. Recurriendo a la imaginación de un astrobiólogo, al enfoque de un historiador y a la pasión de un naturalista, Hazen explica en estas páginas rigurosas y amenas cómo los cambios en el nivel atómico se tradujeron en transformaciones dramáticas en la composición de la Tierra.

epublibre

Robert M. Hazen

LA HISTORIA DE LA TIERRA

Los primeros 4500 millones de años, desde el polvo estelar al planeta viviente

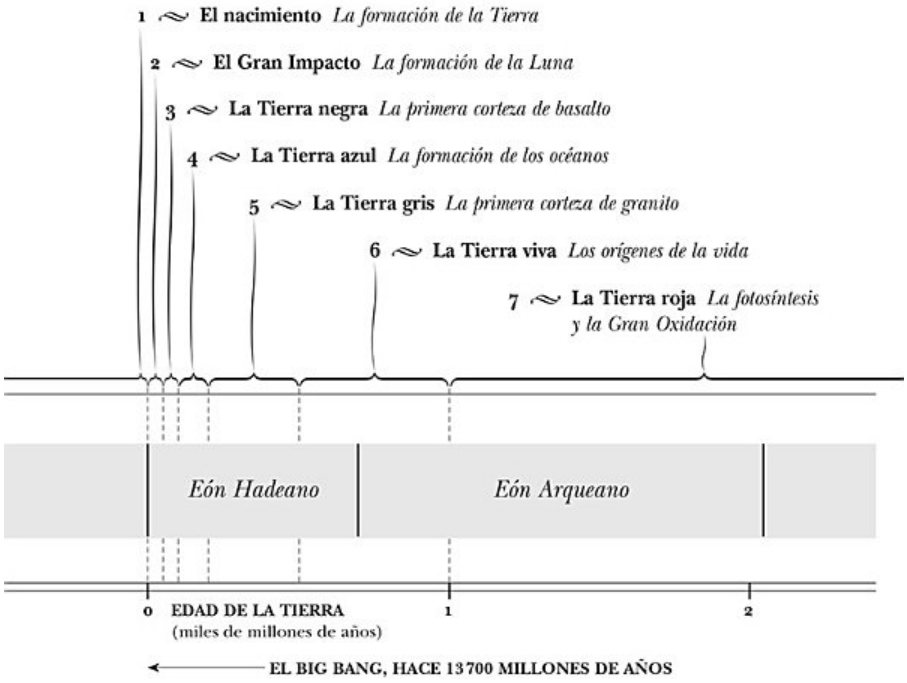
ePub r1.2
Titivillus 01.09.2019

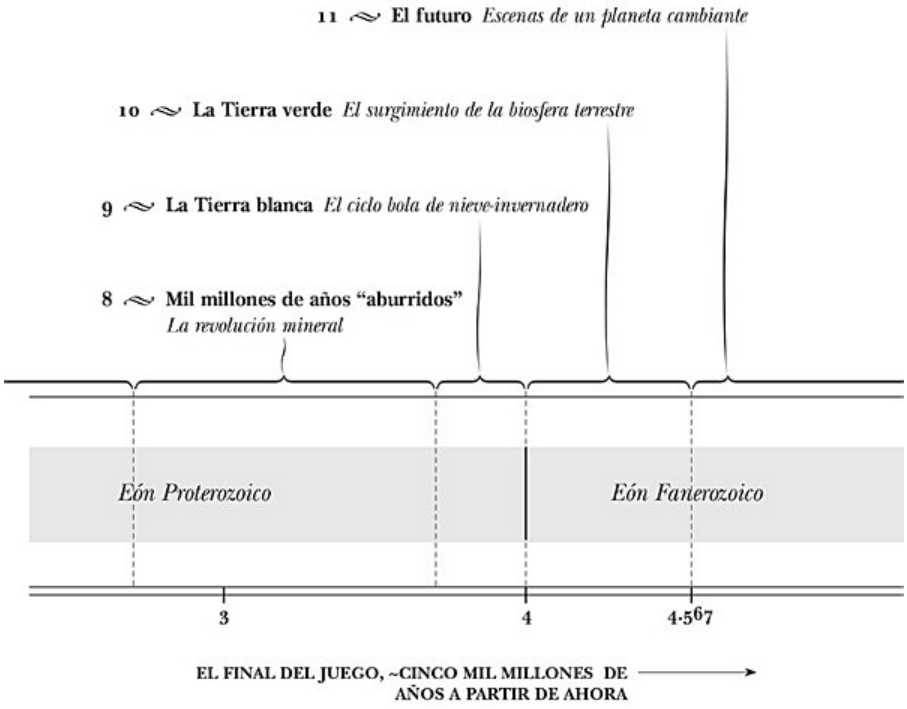
Título original: *The Story of Earth: The First 4.5 Billion Years, from Stardust to Living Planet*
Robert M. Hazen, 2012
Traducción: Maia Fernández Miret Schussheim
Diseño de cubierta: Enigma

Editor digital: Titivillus
ePub base r2.1

Para Gregory.

Las cosas cambiarán;
que tengas la sabiduría y el valor
para adaptarte.


1 El nacimiento La formación de la Tierra
2 El Gran Impacto La formación de la Luna
3 La Tierra negra La primera corteza de basalto
4 La Tierra azul La formación de los océanos
5 La Tierra gris La primera corteza de granito
6 La Tierra viva Los orígenes de la vida
7 La Tierra roja La fotosíntesis y la Gran Oxidación
Eón Hadeano
Eón Arqueano
0
EDAD DE LA TIERRA
(miles de millones de años)
1
2
EL BIG BANG, HACE 13 700 MILLONES DE AÑOS


11 El futuro Escenas de un planeta cambiante
10 La Tierra verde El surgimiento de la biosfera terrestre
9 La Tierra blanca El ciclo bola de nieve-invernadero
8 Mil millones de años "aburridos"
La revolución mineral
Eón Proterozoico
Eón Fanerozoico
3
4
4.567
EL FINAL DEL JUEGO, ~CINCO MIL MILLONES DE AÑOS A PARTIR DE AHORA

INTRODUCCIÓN

Una de las imágenes más extraordinarias del siglo XX es una fotografía que muestra a la Tierra en pleno ascenso sobre el cielo lunar. La tomó, en 1968, un viajero humano que se encontraba en órbita alrededor de nuestro satélite. Hace mucho tiempo que sabemos lo valioso y especial que es nuestro mundo: la Tierra es el único planeta que conocemos que cuenta con océanos, con una atmósfera rica en oxígeno, con vida. Y a pesar de ello, a muchos nos tomó desprevenidos el absoluto y sorprendente contraste entre el desolado paisaje lunar, el vacío muerto y oscuro del espacio, y nuestro hermoso y marmoleado planeta azul y blanco. Desde ese lejano y privilegiado punto de vista la Tierra parece solitaria, pequeña y vulnerable, pero también mucho más hermosa que cualquier otro objeto celeste.

Es fácil entender qué nos hace sentir tan cautivados por nuestro hogar planetario. Más de dos siglos antes del nacimiento de Cristo, el erudito filósofo Eratóstenes de Cirene llevó a cabo el primer experimento documentado en nuestro planeta: para poder medir la circunferencia de la Tierra desarrolló un ingenioso método basado en la simple observación de las sombras. Durante el solsticio de verano, justo al mediodía, Eratóstenes observó el Sol que se alzaba sobre su cabeza en la ciudad ecuatorial de Syene, Egipto, hoy Asuán. Un poste vertical no arrojaba ninguna sombra. Por el contrario, el mis-

mo día, a la misma hora, en la ciudad costera de Alejandría, unos 780 kilómetros al norte, un poste vertical parecido proyectaba una pequeña sombra, y esto revelaba que en ese lugar el Sol no se encontraba exactamente en el cenit. Eratóstenes usó los teoremas geométricos de su antecesor griego Euclides para concluir que la Tierra debía ser una esfera, y calculó que tenía una circunferencia de unos 40 200 kilómetros, una cifra notablemente cercana al valor moderno de 40 075 kilómetros a la altura del Ecuador.

A lo largo de los siglos ha habido miles de estudiosos, unos cuantos famosos pero la mayor parte perdidos para la historia, que han investigado y reflexionado sobre nuestro hogar planetario. Se han preguntado cómo se formó la Tierra, cómo se mueve por los cielos, de qué está hecha y cómo funciona. Y, sobre todo, estos hombres y mujeres de ciencia se han preguntado cómo evolucionó nuestro dinámico planeta, cómo se convirtió en un mundo vivo. Hoy, gracias a nuestro conocimiento acumulativo y a las maravillas de la tecnología humana sabemos más sobre la Tierra de lo que jamás imaginaron los antiguos filósofos. Por supuesto, no lo sabemos todo, pero nuestra comprensión es muy rica y profunda.

Si bien nuestro conocimiento de la Tierra ha ido aumentando desde el origen de la humanidad y se ha refinado durante siglos hasta alcanzar cierto grado de consenso, buena parte de ese progreso ha revelado que estudiar la Tierra es estudiar el cambio.

Hay muchas líneas de evidencia basadas en la observación que apuntan a la naturaleza fluctuante de la Tierra, año con año, época con época. Los depósitos de sedimentos rítmicos o varvados en algunos lagos glaciales de Escandinavia muestran más de 13 mil años de estratos alternados de partículas gruesas y finas, que se formaron como consecuencia de erosiones

más o menos rápidas durante los deshielos anuales de primavera. Los núcleos de hielo extraídos de la Antártida y Groenlandia revelan más de 800 mil años de acumulaciones estacionales de hielo. Y los delgadísimos depósitos de sedimentos de Green River Shale, en Wyoming, preservan más de un millón de años de eventos anuales. Cada una de esas capas descansa sobre rocas mucho más antiguas, que a su vez ofrecen indicios de grandes ciclos de cambios.

Al medir los procesos geológicos graduales obtenemos pistas sobre periodos aún más largos de la historia de la Tierra. La formación de las inmensas islas hawaianas requirió una actividad volcánica lenta y sostenida, una sucesión de capas de lava que se acumularon, unas sobre otras, a lo largo de millones de años. Los Apalaches y otras viejas y redondeadas cordilleras montañosas surgieron después de cientos de millones de años de erosión gradual, resaltados por grandes derrumbes. A lo largo de la historia geológica los movimientos, a veces espasmódicos, de las placas tectónicas han desplazado continentes, elevado montañas y abierto océanos.

La Tierra siempre ha sido un planeta inquieto, en constante evolución. Desde el núcleo hasta el manto, se encuentra en cambio perpetuo. Aun hoy, el aire, los océanos y la tierra están cambiando, tal vez a un paso inédito en el pasado reciente de nuestro planeta. Sería insensato permanecer indiferentes ante estos inquietantes cambios globales, y para muchos de nosotros resulta imposible, pues nuestra curiosidad y nuestro amor por nuestro hogar nos resultan tan naturales como lo fueron para Eratóstenes. Pero sería igualmente insensato ocuparse del estado actual de la Tierra sin aprovechar plenamente lo que nos cuenta sobre su pasado, sorprendentemente lleno de acontecimientos, sobre su presente impredeciblemente dinámico, y sobre nosotros y nuestro lugar en su futuro.

He pasado la mayor parte de mi vida tratando de entender nuestro hogar, este lugar tan vibrante y complejo. De niño coleccionaba rocas y minerales, abarrotaba mi cuarto con fósiles y cristales que se codeaban con toda clase de bichos y huesos. Toda mi carrera profesional ha tenido como eje el tema de la Tierra. Al principio me dediqué a experimentar en la escala submicroscópica de los átomos, a estudiar la estructura molecular de los minerales que conforman las rocas, a calentar y a comprimir los diminutos granos de minerales como si estuvieran dentro de una olla de presión para documentar los efectos de estas condiciones extremas en las profundidades de la Tierra.

Con el tiempo, mi perspectiva cambió y se abrió a las grandes escalas espaciales y temporales de la geología. Desde los desiertos de África del Norte a los campos de hielo de Groenlandia; de las costas de Hawai a las cumbres de las Rocosas; de la Gran Barrera de Arrecifes en Australia a los arrecifes fósiles de coral en una docena de países, las bibliotecas naturales de la Tierra revelan una historia de miles de millones de años de coevolución compartida por los elementos, los minerales, las rocas y la vida. Conforme mi programa de investigación dio un viraje hacia los posibles papeles de los minerales en los antiguos orígenes geoquímicos de la vida, me he deleitado realizando estudios que sugieren que la coevolución de la vida y los minerales a lo largo de la historia de la Tierra es aún más sorprendente de lo que nos habíamos imaginado: no sólo es verdad que algunas rocas surgen a partir de la vida, como resulta evidente en las cuevas de roca caliza a lo largo de los continentes, sino que la vida misma puede haber surgido de las rocas. Durante cuatro mil millones de años las historias evoluti-

vas de los minerales y la vida —la geología y la biología— se han entretejido en formas extraordinarias que apenas hoy comenzamos a vislumbrar. En 2008 estas ideas culminaron en un artículo poco convencional sobre «evolución mineral», un argumento nuevo y controversial que algunos recibieron con beneplácito y representó lo que tal vez fuera el primer cambio de paradigma en mineralogía de los últimos dos siglos, y que otros vieron con recelo, como un replanteamiento tal vez herético de nuestra ciencia en el contexto del tiempo profundo.

Si bien la antigua disciplina de la mineralogía es absolutamente central para todo lo que sabemos sobre la Tierra y su interesante pasado, curiosamente ha permanecido bastante estática e indiferente a los caprichos conceptuales de cada época. Durante más de dos siglos las mediciones de composición química, densidad, dureza, propiedades ópticas y estructura cristalina han sido el alimento cotidiano en la vida de los mineralogistas. Si visitas cualquier museo de historia natural entenderás lo que digo: verás vitrinas y vitrinas llenas de cristales fantásticos, con etiquetas que muestran su nombre, su fórmula química, su sistema cristalino y su localización. Estos atesorados fragmentos de la Tierra son muy valiosos en el contexto histórico, pero posiblemente no nos ofrezcan ninguna pista sobre su edad o sus transformaciones geológicas subsecuentes. La vieja escuela básicamente separa los minerales de sus apasionantes historias de vida.

Esta perspectiva tradicional tiene que cambiar. Mientras más examinamos el rico registro geológico de la Tierra, más comprobamos que el mundo natural, tanto el vivo como el inanimado, se ha transformado una y otra vez. Cada vez entendemos mejor las duales realidades planetarias del tiempo y el cambio, y esto nos permite hacer conjeturas no sólo sobre *cómo* se formaron los minerales, sino *cuándo*. Recientemente se

han descubierto organismos en lugares que tradicionalmente se consideraban inhóspitos para la vida: chimeneas volcánicas supercalientes, pozas ácidas, hielo ártico y polvo estratosférico, y esto ha hecho que la mineralogía sea vista cada vez más como una disciplina clave en la búsqueda por comprender los orígenes y la supervivencia de la vida. En el número de noviembre de 2008 de la publicación emblemática del área, *American Mineralogist*, mis colegas y yo propusimos una nueva forma de pensar sobre el reino mineral y sus increíbles transformaciones a través de la dimensión inexplorada del tiempo. Hicimos énfasis en que hace muchos miles de millones de años no existían minerales en el cosmos. No podían haberse formado, y mucho menos sobrevivido, compuestos cristalinos en el torbellino supercaliente que siguió al *Big Bang*. Tuvo que transcurrir medio millón de años para que se formaran los primeros átomos —hidrógeno, helio y un poco de litio— en el caldero de la creación. Millones de años después la gravedad amalgamó estos elementos gaseosos primordiales en las primeras nebulosas y luego las hizo colapsar para formar las primeras estrellas incandescentes, densas y calientes. La saga mineralógica del cosmos sólo pudo dar inicio cuando esas primeras estrellas explotaron para convertirse en brillantes supernovas, cuando las capas de gases ricos en elementos se condensaron en los primeros diminutos cristales de diamante.

Es por eso que me he convertido en un lector compulsivo del testimonio de las rocas, las historias —apasionantes, si bien a veces fragmentarias y ambiguas— que narran cosas sobre el nacimiento y la muerte, la estasis y la fluctuación, los orígenes y la evolución. Esta grandiosa historia de la Tierra, en la que se entretejen las esferas de lo vivo y de lo inanimado —la coevolución de la vida y de las rocas— es una cosa sorprendente. Y hay que compartirla, porque nosotros *somos* la

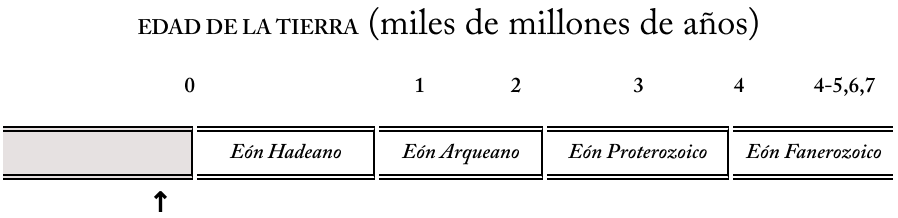
Tierra. Todo lo que nos da cobijo y sustento, todos los objetos que poseemos, y de hecho cada uno de los átomos y moléculas que constituyen nuestros caparazones de carne, provienen de la Tierra y a ella regresarán. Conocer nuestro hogar es, pues, conocer una parte de nosotros mismos.

También hay que compartir la historia de la Tierra porque nuestros océanos y nuestras atmósferas están cambiando a un ritmo casi nunca igualado en su larga historia. El nivel de los océanos se está elevando, y sus aguas se están volviendo más cálidas y ácidas. Los patrones globales de lluvia están cambiando y la atmósfera se está volviendo más turbulenta. El hielo polar se derrite, la tundra se descongela y los hábitats se desplazan. Como exploraremos en las páginas que siguen, la historia de la Tierra es una saga de cambio, pero en las raras ocasiones en las que el cambio ocurrió con la misma alarmante rapidez que hoy, la vida parece haber tenido que pagar un terrible precio. Si actuamos con cuidado y oportunamente, por nuestro propio bien, tenemos que volvernos íntimos de la Tierra y de su historia, pues como revela en forma sublime esa maravillosa fotografía tomada desde un mundo sin vida a 385 mil kilómetros de distancia, no tenemos otro hogar.

En la tradición de Eratóstenes y de las miles de mentes curiosas que lo han seguido, mi propósito en este libro es transmitir la historia del cambio en la Tierra. Si bien ésta nos parece muy inmediata y familiar, su animada historia abarca una sucesión de transformaciones casi imposibles de imaginar. Para conocer de verdad tu hogar planetario y para aprehender los eones que le dieron forma, primero tienes que comprender siete verdades capitales.

1. La Tierra está hecha de átomos reciclados y en continuo reciclaje.
2. La Tierra es enormemente vieja si se la compara con la duración de las vidas humanas.
3. La Tierra es tridimensional, y la mayor parte de la acción ocurre fuera de la vista.
4. Las rocas son los archivos de la historia de la Tierra.
5. Los sistemas terrestres —las rocas, los océanos, la atmósfera y la vida— están interconectados en formas complejas.
6. La historia de la Tierra incluye largos periodos de estasis marcados por eventos a veces repentinos e irreversibles.
7. La vida en la superficie de la Tierra ha cambiado y sigue cambiando.

Estos conceptos sobre la existencia de la Tierra permean las muchas capas y capas de historias de los átomos, los minerales, las rocas y la vida en una gran epopeya de espacio y tiempo; volveremos a encontrarlas en las páginas que siguen, en cada etapa de los feroces orígenes del universo y la extensa evolución de la Tierra. La coevolución de la Tierra y la vida, el nuevo paradigma que se encuentra en el corazón de este libro, es parte de una secuencia irreversible de etapas evolutivas que se remontan al *Big Bang*. Cada etapa dio paso a los nuevos fenómenos y procesos planetarios que, finalmente, esculpirían la superficie de nuestro planeta una y otra vez, pavimentando inexorablemente el camino para el mundo maravilloso en el que vivimos hoy. Ésta es la historia de la Tierra.



Capítulo 1

El nacimiento

La formación de la Tierra

Los miles de millones de años previos a la formación de la Tierra

En el comienzo no había Tierra, ni un Sol que le diera calor. Se puede decir que nuestro sistema solar, con su brillante estrella central y su surtido de planetas y lunas, es un recién llegado al cosmos, con apenas 4567 millones de años de edad. Tuvieron que pasar muchas cosas antes de que nuestro mundo pudiera emerger del vacío.

Mucho, mucho antes, en el origen de todas las cosas —el *Big Bang*—, hace unos 13 700 millones de años según los últimos cálculos, la mesa ya estaba servida para el nacimiento de nuestro planeta. Ese momento de creación sigue siendo el más elusivo e incomprensible, el evento más definitivo en la historia del universo. Se trató de una singularidad: una transformación de nada a algo que sigue estando fuera del alcance de la ciencia moderna o de la lógica de las matemáticas. Si buscas indicios de un dios creador en el cosmos, el *Big Bang* es el lugar indicado para empezar.

En el comienzo todo el espacio, toda la energía y toda la materia nacieron a partir de un vacío inescrutable. Nada. Lue-

go algo. Esta idea escapa a nuestra capacidad de elaborar metáforas. Nuestro universo no apareció donde sólo existía el vacío, porque antes del *Big Bang* no había volumen y no había tiempo. Nuestro concepto de la nada implica el vacío; antes del *Big Bang* no existía nada que contuviera el vacío.

Entonces, en un instante, no sólo había algo sino todo lo que podría existir, todo al mismo tiempo. Nuestro universo adoptó un volumen más pequeño que un núcleo atómico. Ese universo ultracompactado comenzó como pura energía homogénea, sin partículas que echaran a perder su perfecta uniformidad. El universo se expandió rápidamente, pero no en el espacio o en cualquier otra cosa fuera de él (no existe el *afuera* para nuestro universo). El volumen mismo, aún en forma de energía caliente, nació y creció. Conforme la existencia se expandió, también se enfrió. Una fracción de segundo después del *Big Bang* aparecieron las primeras partículas subatómicas: los electrones y los quarks, la esencia invisible de todos los sólidos, líquidos y gases de nuestro mundo se materializaron a partir de energía pura. Poco después, todavía durante la primera fracción del primer segundo cósmico, los quarks se combinaron en pares y tríadas para formar partículas más grandes, entre ellas los protones y los neutrones que pueblan los núcleos de cada átomo. Las cosas estaban ridículamente calientes, y permanecieron así por unos 500 mil años, hasta que la continua expansión finalmente enfrió el cosmos a unos cuantos miles de grados, lo suficiente para que los electrones se acoplaran a los núcleos y formaran los primeros átomos. La abrumadora mayoría de esos primeros átomos —más de 90 por ciento— fueron de hidrógeno, con un pequeño porcentaje de helio y un rastro de litio. Esta mezcla de elementos conformó las primeras estrellas.

La gravedad es la gran fuerza de aglomeración cósmica. Un átomo de hidrógeno es una cosa muy pequeña, pero si tomas un átomo y lo multiplicas por diez elevado a la sesenta potencia (es decir, un billón de billones de billones de billones de billones de átomos de hidrógeno), ejercerán uno sobre otro una fuerza gravitacional colectiva bastante impresionante. La gravedad los jala hacia adentro, hacia un centro común, y forma una estrella: una bola gigante de gas con unas presiones épicas en el núcleo. Cuando una gigantesca nube de hidrógeno colapsa, el proceso de formación estelar transforma la energía cinética de los átomos en movimiento en la energía gravitacional potencial de su estado agregado, que se traduce nuevamente en calor; es el mismo proceso violento que ocurre cuando un asteroide choca contra la Tierra, pero en el caso de las estrellas libera una cantidad de energía inmensamente mayor. El núcleo de la esfera de hidrógeno eventualmente alcanza temperaturas de millones de grados y presiones de millones de atmósferas.

Estas enormes temperaturas y presiones desencadenan un nuevo fenómeno llamado reacciones de fusión nuclear. Bajo estas condiciones extremas los núcleos de dos átomos de hidrógeno (cada uno con un protón) chocan con tanta fuerza que los neutrones pasan de un núcleo al otro, lo que provoca que algunos átomos de hidrógeno tengan más masa que otros. Tras varias de estas colisiones se forma un núcleo de helio con dos protones. Sorprendentemente, el átomo de helio que resulta es más o menos uno por ciento menos masivo que los átomos de hidrógeno originales a partir de los cuales se formó. Esa masa perdida se convierte directamente en energía calorífica (igual que sucede en una bomba de hidrógeno), lo cual

promueve más y más reacciones de fusión. La estrella «se enciende», inunda sus alrededores con energía radiante y se vuelve cada vez más rica en helio, a expensas del hidrógeno.

Las estrellas grandes, muchas de ellas mucho más grandes que nuestro Sol, terminaron agotando los prodigiosos suministros de hidrógeno de sus núcleos. Pero sus inmensas temperaturas y presiones internas aún permitían la fusión nuclear. Los átomos de helio, con dos protones, se fusionaron en el núcleo estelar para hacer carbono, con sus seis protones: el elemento esencial de la vida, mientras nuevos pulsos de energía nuclear desencadenaban la fusión del hidrógeno en una capa esférica de átomos alrededor del núcleo. El carbono del núcleo se fusionó para hacer neón, el neón para hacer oxígeno, luego magnesio, silicio, azufre, y la historia siguió y siguió. Poco a poco la estrella desarrolló una estructura de cebolla, con capa sobre capa de reacciones de fusión. Las reacciones comenzaron a ocurrir más rápido, hasta que la estrella alcanzó la fase de producción de hierro, que no duró más que un día. Para este momento del ciclo de vida de las primeras estrellas, muchos millones de años después del *Big Bang*, las reacciones de fusión habían creado ya la mayor parte de los veintiséis primeros elementos de la tabla periódica.

Este proceso de fusión nuclear no puede ir más allá del hierro. Cuando el hidrógeno se fusiona para producir helio, cuando el helio se fusiona para producir carbono, y durante todos los otros pasos de la fusión, se emite una gran cantidad de energía nuclear. Pero el hierro tiene la energía más baja de los núcleos atómicos. Del mismo modo que un fuego abrasador transforma hasta la última pizca de combustible en cenizas, para este momento toda la energía se ha agotado. El hierro es la última ceniza nuclear: no se puede extraer energía nuclear de la fusión del hierro con ningún otro elemento. Así que

cuando la primera estrella gigantesca produjo su inevitable núcleo de hierro la historia se había terminado y los resultados serían catastróficos. Hasta ese punto la estrella había mantenido un equilibrio estable en el que sus dos grandes fuerzas, la gravedad que jala la masa hacia el centro y las reacciones nucleares que la empujan hacia afuera, se contraponían exactamente. Cuando el núcleo se llenó de hierro la presión hacia afuera se detuvo, y la gravedad ganó la partida en un instante de violencia inimaginable. Toda la estrella colapsó con tal velocidad que rebotó y explotó en forma de la primera supernova. La estrella se hizo pedazos, y la mayor parte de su masa salió disparada hacia el espacio.

Nace la química

Para los lectores que buscan evidencias de un diseño en el cosmos, las supernovas son casi tan buen lugar para empezar como el *Big Bang*. Por supuesto que el *Big Bang* condujo inevitablemente a los átomos de hidrógeno, y los átomos de hidrógeno produjeron, igual de inexorablemente, las primeras estrellas. Pero no resulta tan obvio cómo las estrellas pudieron dar origen, ellas solas, a nuestro mundo viviente. De entrada no parece que una gran bola de hidrógeno nos vaya a llevar a ninguna conclusión interesante, a pesar de que en su núcleo comiencen a acumularse elementos cada vez más pesados, hasta llegar al hierro.

Pero cuando explotaron las primeras grandes estrellas les siguió un poco de novedad cósmica. Estos cuerpos fracturados sembraron el espacio con los elementos que habían creado. Algunos de estos elementos eran especialmente abundantes: carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre, los elementos de

la vida. También abundaban el magnesio, el silicio, el hierro, el aluminio y el calcio, que dominan en la composición de muchas rocas comunes y forman una parte importante de la masa de los planetas similares a la Tierra. Pero en el interior, incomprensiblemente energético, de estas estrellas en explosión los elementos se fusionaron en formas nuevas y exóticas para formar *toda* la tabla periódica: los elementos más allá del número veintiséis. Así aparecieron las primeras trazas de muchos elementos raros: los valiosos, como oro y plata; los útiles, como el cobre y el zinc; los tóxicos, como el arsénico y el mercurio, y los radiactivos, como el uranio y el plutonio. Todos estos elementos fueron lanzados al espacio, donde estuvieron libres de encontrarse unos con otros y combinarse en formas nuevas e interesantes mediante reacciones químicas.

La química ocurre cuando un átomo cualquiera choca con otro. Cada átomo tiene un núcleo diminuto pero masivo que posee una carga eléctrica positiva, y está rodeado por una nube de uno o más electrones cargados negativamente. Los núcleos atómicos aislados casi nunca interactúan, excepto en la olla a presión del interior de las estrellas. Pero los electrones de un átomo siempre están chocando con los electrones de los átomos adyacentes. Las reacciones químicas suceden cuando dos o más átomos se encuentran y sus electrones interactúan y se reacomodan. Esta mescolanza e intercambio de electrones ocurre porque hay ciertas combinaciones de electrones, en especial los grupos de 2, 10 o 18 electrones, que son particularmente estables.

Las primeras reacciones químicas que siguieron al *Big Bang* produjeron moléculas: pequeños racimos hechos de unos pocos átomos unidos fuertemente en una sola unidad. Antes incluso de que los átomos de hidrógeno empezaran a fusionarse en las estrellas para formar helio, en las profundidades del es-

pacio vacío se estaban formando moléculas de hidrógeno (H_2), cada una con dos átomos de hidrógeno enlazados entre sí. Cada átomo de hidrógeno tiene un solo electrón, una situación más bien inestable en un universo en el que dos electrones es un número mágico. Así que cuando se encuentran dos átomos de hidrógeno, unen sus recursos para formar una molécula con ese número mágico de electrones en común. Dada la abundancia de hidrógeno tras el *Big Bang*, las moléculas de hidrógeno seguramente antecedieron a las primeras estrellas, y han sido un rasgo perpetuo de nuestro cosmos desde que aparecieron los primeros átomos.

Tras la primera supernova, el espacio se vio sembrado de una variedad de elementos que podían formar muchas otras moléculas interesantes. El agua (H_2O), con dos átomos de hidrógeno enlazados a un átomo de oxígeno, fue una de las primeras moléculas. Es posible que el espacio alrededor de las primeras supernovas también estuviera enriquecido por moléculas de nitrógeno (N_2), amoniaco (NH_3), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2). Todas estas especies químicas estaban destinadas a desempeñar papeles clave en la formación de los planetas y en el origen de la vida.

Luego le tocó el turno a los minerales, volúmenes sólidos microscópicos de perfección química y orden cristalino. Los primeros minerales sólo pudieron formarse cuando las densidades de los elementos mineralizadores resultaron lo suficientemente altas, y las temperaturas lo suficientemente bajas, para que los átomos se ordenaran en forma de pequeños cristales. Sólo unos cuantos millones de años después del *Big Bang* las envolturas de las primeras estrellas que explotaron, cada vez más extensas y frías, eran el escenario perfecto para estas reacciones. Es probable que los primeros minerales en el uni-

verso fueran diminutos cristalitos de carbono, diamante y grafito puro. Esos cristales pioneros eran como un polvo fino; los granos individuales eran microscópicos, pero tal vez lo suficientemente grandes como para darle al espacio un poco de brillo de diamantes. Las formas cristalinas del carbono pronto se vieron acompañadas por otros sólidos a alta temperatura que incluían los elementos más comunes, como magnesio, calcio, silicio, nitrógeno y oxígeno. Algunos eran minerales comunes, como el corindón, el compuesto químico del aluminio y el oxígeno que es tan apreciado en sus variedades de color: el rubí y el zafiro. También aparecieron cantidades diminutas de olivino, hecha de silicato de magnesio y piedra zodiacal de los nacidos en agosto. La acompañó la moissanita, un carburo de silicio que en nuestros días suele venderse como un barato sustituto sintético del diamante. El polvo interplanetario puede haber albergado en total una docena de «protominerales». Así, con la explosión de las primeras estrellas el universo comenzó a ponerse más interesante.

Nada sucede una sola vez en nuestro universo (excepto tal vez el *Big Bang*). Los escombros dispersos de las viejas estrellas que hicieron explosión estuvieron siempre sujetos a la fuerza organizadora de la gravedad. Así, los restos de las viejas generaciones de estrellas inevitablemente terminaron dentro de nuevas poblaciones de estrellas al formar nuevas nebulosas; cada una era una enorme nube interestelar de gas y polvo que representaba las ruinas de muchas estrellas anteriores. Cada nueva nebulosa era más rica en hierro y más pobre en hidrógeno que la anterior. Este ciclo se ha mantenido durante 13 700 millones de años, conforme las viejas estrellas producen nuevas estrellas y lentamente transforman la composición del cosmos. En incontables millones de galaxias han surgido incontables millones de estrellas.

Había una vez, hace cinco mil millones de años, a medio camino del centro de la Vía Láctea, en la orilla deshabitada del brazo de una espiral salpicada de estrellas, un punto que estaba destinado a convertirse en nuestro terruño. Era un barrio modesto, y no había mucho más que una gran nebulosa de gas y polvo congelado que se extendía a lo largo de años luz por el oscuro vacío. Nueve de cada diez partes de esa nube estaban compuestas de átomos de hidrógeno; nueve de cada diez partes de lo que restaba eran átomos de helio. El hielo y el polvo, ricos en pequeñas moléculas orgánicas y en granos microscópicos de minerales, conformaban el uno por ciento restante.

Una nebulosa puede pasar muchos millones de años flotando en el espacio antes de que un detonador —por ejemplo la onda de choque producida por la explosión de una estrella cercana— desencadene su colapso y comience la formación de un nuevo sistema estelar. Hace casi 4600 millones de años uno de estos detonadores marcó el inicio de nuestro sistema solar. Muy lentamente, en el transcurso de un millón de años, el remolino de gas presolar y polvo se contrajo. Igual que un patinador sobre hielo que gira a gran velocidad, la enorme nube comenzó a rotar más y más rápido conforme la gravedad la obligó a acercar sus pequeños brazos hacia su centro. Cuando la nube colapsó y empezó a girar aún más rápido, se volvió más densa y se convirtió en un disco aplanado con una protuberancia central cada vez más grande: el Sol naciente. Ese hambriento ovillo central, rico en hidrógeno, creció más y más, hasta que finalmente se tragó 99.9 por ciento de la masa de la nube. Conforme crecía, las presiones y las temperaturas

internas alcanzaron el punto de fusión nuclear y encendieron nuestro Sol.

En los archivos de nuestro sistema solar, es decir: sus planetas y sus lunas, sus cometas y sus asteroides y sus abundantes y variados meteoritos, se conservan algunas pistas de lo que sucedió después. Una característica llamativa es que todos los planetas y las lunas orbitan el Sol en el mismo plano y en la misma dirección. Es más, el Sol y casi todos los planetas giran sobre su eje en más o menos el mismo plano y la misma dirección. No hay ninguna ley del movimiento que exija esta comunidad de giros; los planetas y las lunas podrían orbitar y girar en cualquier dirección —norte a sur, este a oeste, de arriba abajo, de abajo arriba— y aun así obedecerían la ley de la gravedad. Uno esperaría un revoltijo así si los planetas y las lunas hubieran sido capturados de fuentes distantes y arbitrarias. Pero, por el contrario, la casi perfecta uniformidad orbital que puede observarse en nuestro sistema solar sugiere que los planetas y las lunas se fusionaron a partir del mismo disco plano de gas y polvo en movimiento más o menos al mismo tiempo. Todos estos enormes objetos conservan el mismo sentido de rotación —el momento angular que comparte todo el sistema solar— desde aquellos tiempos de la turbulenta nube original.

Podemos encontrar una segunda pista sobre los orígenes del sistema solar en la característica distribución de sus ocho planetas principales. Los cuatro planetas más cercanos al Sol —Mercurio, Venus, la Tierra y Marte— son mundos rocosos relativamente pequeños, compuestos en su mayor parte por silicio, oxígeno, magnesio y hierro. Sus superficies están dominadas por rocas densas, como el basalto volcánico negro. Por el contrario, los cuatro planetas exteriores —Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno— son gigantes de gas hechos sobre todo de hidrógeno y helio. Estas inmensas esferas no tienen superficies

sólidas, sólo una atmósfera que se hace más densa conforme más te internas en ellas. Esta dicotomía de los mundos sugiere que en los inicios del sistema solar, a unos pocos miles de años del nacimiento del Sol, un intenso viento solar empujó el hidrógeno y el helio sobrante hacia las zonas exteriores y más frías. Al estar lo suficientemente lejos del calor del Sol, estos gases volátiles pudieron enfriarse, condensarse y reunirse en esferas propias. En contraste, los granos de polvo, más gruesos y ricos en minerales, permanecieron cerca de la ardiente estrella central, y muy pronto se arremolinaron para formar los planetas rocosos internos.

La increíblemente rica y diversa variedad de meteoritos de nuestro sistema solar conserva muy bien los detalles de los procesos violentos que dieron forma a la Tierra y a los otros planetas interiores. Inquieta un poco pensar que nuestro hogar se ve constantemente acribillado por piedras que caen del cielo. De hecho, la comunidad científica no les hizo mucho caso sino hasta hace unos dos siglos, aunque seguramente en el folclore popular no faltaban historias pintorescas sobre caídas de meteoritos (incluyendo varias protagonizadas por unos desdichados campesinos franceses). Sin embargo, incluso cuando los estudiosos comenzaron a describir la caída de meteoritos de manera más formal resultaba muy difícil obtener pruebas científicas reproducibles para documentarlos, y mucho menos para explicar su origen. Cuando el político y naturalista estadounidense Thomas Jefferson leyó un reporte técnico de la Universidad de Yale sobre un impacto de meteorito que se observó en Weston, Connecticut, bromeó: «Me resulta más fácil creer que mientan dos profesores yanquis a que las piedras caigan del cielo».

Dos siglos y decenas de miles de hallazgos de meteoritos después su veracidad ya no está en duda. Hoy los expertos en

meteoritos cubren más terreno, los coleccionistas ávidos compiten por obtener los especímenes más raros y las colecciones públicas y privadas siguen creciendo. Durante un tiempo estas colecciones tenían una marcada preferencia por los meteoritos metálicos, cuyas características cortezas negras, sus curiosas formas esculpidas y su densidad inusualmente alta los hacía destacarse de las rocas comunes. Pero el descubrimiento, en 1969, de miles de meteoritos que descansaban en los prístinos campos de hielo de la Antártida cambió esa percepción.

Los meteoritos constituyen pistas muy reveladoras sobre el origen de nuestro planeta. Los más antiguos y comunes, las condritas de 4566 millones de años, se remontan justo a la época previa a que se formaran los planetas y las lunas del sistema solar, cuando el reactor nuclear del interior del Sol se encendió por primera vez y emitió una intensa energía radiante que redujo a cenizas la nebulosa circundante. Ese efecto de alto horno derritió el disco de polvo y lo redujo a grumos formados por pequeñas gotitas de roca llamados *cóndrulos*, término que viene de la palabra griega que significa «grano». Estos productos del fuego solar, que iban del tamaño de una canica grande hasta el de una arveja, se derritieron muchas veces, durante varios pulsos de radiación que transformaron la región más cercana al Sol. Los racimos de estos antiguos cóndrulos, aglutinados gracias al polvo y a los fragmentos de minerales presolares, son los componentes de las antiguas condritas que han aterrizado en la Tierra por millones. Las condritas nos ofrecen la mejor perspectiva sobre el breve lapso de tiempo que transcurrió entre el nacimiento del Sol y la formación de los planetas.

Existe una segunda clase de meteoritos más jóvenes, llamados en forma genérica acondritas, que datan de la época en la que los primeros materiales del sistema solar estaban siendo

fundidos, despedazados y en general transformados de diversas maneras. La variedad de meteoritos acondríticos resulta sorprendente: pepitas de metal brillante, trozos de roca ennegrecida, unos tan finos como el vidrio, otros que contienen cristales brillantes de dos centímetros de largo. Todavía se están descubriendo nuevas variedades en algunas de las regiones más remotas de la Tierra.

La Antártida posee vastas planicies cubiertas de antiguos hielos azules, lugares en los que nunca nieva y cuya superficie helada puede permanecer inalterada durante muchos miles de años. Las rocas que caen del espacio se quedan ahí, objetos oscuros y fuera de lugar que yacen en espera de ser encontrados. Existen tratados comerciales que prohíben la explotación comercial de esas áreas, y además son zonas tan inaccesibles que estos recursos extraterrestres permanecen reservados para el estudio científico. Cada cierto tiempo, grupos de científicos equipados con helicópteros y motonieves, y muy bien abrigados, peinan sistemáticamente cada kilómetro de estos imponentes desiertos de hielo. Registran y guardan cuidadosamente cada uno de sus hallazgos, y se aseguran de que ni una mano ni un hálito contaminen su superficie. Cuando regresan a la civilización, tras cada temporada de verano ártico, estos cazadores de meteoritos entregan sus tesoros a las colecciones públicas, en especial a las bodegas del Smithsonian Institute en la zona suburbana de Suitland, Maryland, donde se conservan muchos miles de especímenes en gabinetes hiperlimpios y herméticos dentro de edificios tan grandes como campos de fútbol.

Los grandes desiertos de Australia, América del Sur, la Península Arábiga y especialmente África del Norte —el enorme desierto del Sahara— son igual de ricos en meteoritos, pero menos apropiados para la recuperación y el almacenamiento

estéril. Entre los nómadas que cruzan el Sahara —los tuaregs, los bereberes, los fezzanis— se ha corrido la voz de que los meteoritos pueden ser valiosos. Se cuenta que un solo valiosísimo meteorito lunar que se encontró en algún punto de las cambiantes arenas de África del Norte a principios de los años veinte alcanzó un valor de un millón de dólares en una venta privada. Para un jinete resulta muy fácil bajarse de su camello y llevar cualquier piedra extraña hasta el próximo pueblo, donde algún representante de un gremio extraoficial de intermediarios de meteoritos, en contacto con otros mediante teléfonos satelitales y con buena labia, le ofrecerá una suma ridícula en efectivo. Las bolsas de rocas pasan de un comerciante a otro, cada vez con más valor agregado, hasta que llegan a Marrakech, Rabat o El Cairo y de allí viajan hasta los compradores de eBay y las grandes exposiciones internacionales de rocas y minerales.

Me ha tocado, más de una vez, que durante una expedición geológica en alguna zona lejana de Marruecos me ofrezcan bolsas de lona con cinco o diez kilos de rocas que se supone que son meteoritos: «sin intermediarios, recién salidas del desierto, las encontramos la semana pasada». Estas «ofertas» sólo en efectivo suelen llevarse a cabo en los cuartitos sucios y sin ventanas de casas de arcilla, lejos del ardiente sol del desierto y donde resulta casi imposible ver qué es lo que están ofreciendo. Una vez que se cumplen las formalidades de los saludos y se han compartido las tradicionales tazas de té de menta, el vendedor tira el contenido de la bolsa sobre una alfombra. Algunas rocas son sólo rocas. Lastre. Es como una prueba para ver si sabes del tema. Unas cuantas son los tipos más comunes de condritas, del tamaño de una aceituna o un huevo, algunas con una linda corteza de fusión como resultado de su feroz caída del cielo. El precio de salida siempre es demasiado alto.

Si dices que son rocas muy vulgares es posible que aparezca una segunda bolsa, más pequeña, que tal vez contenga un meteorito metálico o algo aún más exótico.

Recuerdo una compra que negoció nuestro guía, Abdula, a la orilla de una carretera polvorienta unos kilómetros al este de Scoura. El vendedor, un pariente lejano con credenciales muy dudosas, llamó por su teléfono satelital y exigió absoluta confidencialidad. «Puede ser marciana», le dijo a Abdula. «Novecientos gramos. Sólo veinte mil dirhams». Equivalían a 2400 dólares, pero si era de verdad podía hacerle compañía a las aproximadamente dos docenas de meteoritos que provienen de Marte, y sería una ganga. Se pusieron de acuerdo sobre la hora y el lugar. Dos automóviles corrientes se detuvieron uno junto a otro. Tres de nosotros salimos y nos paramos en un círculo cerrado. Alguien extrajo amorosamente la roca en cuestión de un saquito de terciopelo. Pero parecía una roca cualquiera (como todos los meteoritos marcianos). El precio bajó a quince mil dirhams. Luego doce mil. Pero no había forma de estar seguros, así que nos abstuvimos. Más tarde Abdula me confesó que se había sentido tentado, pero que siempre habrá otros meteoritos. Mejor no apostarle todo a una sola compra; nadie dice nunca la verdad, y no se aceptan devoluciones.

Como sucede en la Antártida, los desiertos ecuatoriales revelan la distribución natural de toda clase de meteoritos y ofrecen pistas sin igual sobre el carácter del sistema solar en sus inicios, y también sobre los orígenes de nuestro planeta. Lamentablemente, a diferencia de los meteoritos de la Antártida, la mayor parte de estos especímenes nunca llegará a la colección de un museo, y eso al menos por dos razones. La primera y más importante es que la creciente comunidad de coleccionistas aficionados (animada por unos cuantos *amateurs*

con dinero y por la abundancia de rocas del Sahara, fáciles de conseguir) es muy competitiva. Cualquier roca rara se vende a gran velocidad y por mucho dinero. Algunos de esos especímenes sin duda terminan siendo donados a los museos, pero la mayor parte se maneja mal y el valor científico de un hallazgo en condiciones inmaculadas se pierde a causa de la contaminación de las manos desprotegidas, de las bolsas de tela multiusos y de la omnipresente caca de camello. Es igual de preocupante la falta de documentación útil sobre cuándo o dónde se encontraron los meteoritos en el desierto. Todos los comerciantes dicen que en Marruecos, lo cual suele ser falso, pues la mayor parte del Sahara arenoso se encuentra al este, en Argelia y Libia, países de los que ahora es ilegal importar especímenes. Así que sin una documentación rigurosa la mayor parte de los museos simplemente rechaza los meteoritos «marroquíes» o «norafricanos».

En los terrenos hostiles y áridos del Sahara, o en los campos de hielo de la Antártida, cualquier roca se destaca como un objeto extraño caído del cielo. Este muestreo intacto de la población de meteoritos le ofrece a los científicos la mejor información disponible sobre las primeras etapas del sistema solar, cuando se formó la Tierra. Las condritas representan casi 90 por ciento de los hallazgos; el resto son las variadas acondritas, que tienen su origen en la época, que duró unos cuantos millones de años, en la que nuestro joven sistema solar era una nebulosa turbulenta durante la cual las condritas se agregaron en cuerpos más y más grandes: millones de objetos de unos cuantos milímetros de diámetro que competían por el espacio en un mismo anillo estrecho alrededor del joven Sol.

Crecieron más y más grandes: primero del tamaño de un puño, luego de un auto, luego de un estadio, luego de una ciudad pequeña. Y siguieron creciendo: al tamaño de una ciudad,

luego de un estado. El caótico proceso de acreción que experimentaron estos miles de planetésimos los hizo diversificarse en nuevas formas. Cuando adquirieron unos ochenta kilómetros de diámetro o más se combinaron dos fuerzas de calor igualmente intensas. La energía gravitacional potencial de muchos objetos pequeños que chocaban entre sí alcanzó la misma intensidad que la energía nuclear de los elementos radiactivos de decaimiento rápido como el hafnio y el plutonio. Así, los minerales que conformaban estos planetésimos se transformaron a causa del calor. Sus interiores se derritieron y se diferenciaron en una configuración de zonas minerales distintivas parecida a la de un huevo: un núcleo denso y rico en metales (análogo a la yema del huevo), un manto de silicato de magnesio (la clara) y una corteza delgada y quebradiza (el cascarón). Los planetésimos más grandes resultaron alterados por el calor interno, por reacciones con agua y por el intenso *shock* provocado por las frecuentes colisiones que ocurrían en los atestados suburbios solares. Gracias a estos dinámicos procesos de formación planetaria surgieron unas trescientas especies minerales, que son la materia prima que debe formar todos los planetas rocosos, y todas se encuentran todavía hoy en el diverso surtido de meteoritos que caen a la Tierra.

Ocasionalmente, cuando dos planetésimos grandes chocaban entre sí con fuerza suficiente ambos volaban en pedazos. (Este violento proceso ocurre hasta el día de hoy en el Cinturón de asteroides más allá de Marte, gracias a las perturbaciones gravitacionales del planeta gigante Júpiter). Es por ello que la mayor parte de los meteoritos acondríticos que encontramos hoy representan partes diferentes de miniplanetas que fueron destruidos. Estudiar las acondritas es como estudiar una lección de anatomía con un cadáver que estalló. Se

requiere tiempo, paciencia y pegar muchos pedacitos para obtener una imagen clara del cuerpo original.

Los densos núcleos de metal de los planetésimos, que terminaron convirtiéndose en una clase particular de meteoritos metálicos, son los más fáciles de interpretar. Alguna vez se pensó que eran el tipo más común de meteoritos, pero las muestras imparciales de la Antártida revelan que los metálicos apenas representan un modesto cinco por ciento de los que llegan a la Tierra. Los núcleos de los planetésimos deben haber sido proporcionalmente pequeños.

Los mantos de los planetésimos, ricos en silicio, en claro contraste con la composición de los núcleos, están representados en una multitud de meteoritos de clases exóticas: howarditas, eucritas, diogenitas, ureilitas, acapulcoitas, lodranitas y muchas más, cada una con una composición, una textura y una mineralogía particular y casi siempre bautizadas en honor al lugar en el que se encontró la primera muestra. Algunos de estos meteoritos son análogos a tipos de rocas que se encuentran hoy en la Tierra. Las eucritas representan una forma bastante típica del basalto, el tipo de roca que mana de la dorsal mesoatlántica y que cubre el fondo oceánico. Las diogenitas, que están compuestas principalmente de minerales de silicato de magnesio, parecen ser resultado de cristales que se crearon en grandes cámaras subterráneas de magma. Conforme el magma se enfrió, los cristales más densos que el líquido caliente que los rodeaba crecieron y se depositaron en el fondo para formar una masa concentrada, igual que lo hacen en las cámaras magmáticas de la Tierra actual.

De vez en cuando, durante un choque particularmente destructivo, un meteorito arrancaba parte de la frontera entre el núcleo y el manto de un planetésimo, en el que coexistían trozos de minerales de silicio y metales ricos en hierro. El resul-

tado es una hermosa palasita, una combinación espectacular de metal brillante y de cristales dorados de olivino. Entre los coleccionistas de meteoritos hay pocas piezas más valiosas que las lajas delgadas de palasita pulida, que reflejan la luz en sus partes metálicas y la dejan pasar por la olivino como si se tratara de un vitral.

Conforme la gravedad amalgamó las primeras condritas y la enorme presión, la temperatura ardiente, el agua corrosiva y los impactos violentos dieron nueva forma a los planetésimos en crecimiento, se formaron más y más nuevos minerales. En total se han encontrado más de 250 minerales diferentes en todas las variedades de meteoritos, veinte veces más que la docena de minerales solares primordiales. Estos sólidos son muy variados, e incluyen las primeras arcillas de grano delgado, mica laminada y circonios semipreciosos que se convirtieron en los materiales de construcción de la Tierra y de otros planetas. Los planetésimos crecieron más y más, y los más grandes se tragaron a los más pequeños. Eventualmente unas pocas docenas de rocas redondeadas, cada una del tamaño de un planeta pequeño, empezaron a hacer las veces de enormes aspiradoras espaciales y barrieron con la mayor parte del gas y del polvo que quedaba en el sistema solar conforme se fusionaron y adquirieron órbitas semicirculares alrededor del Sol. La posición en la que acabó cada uno de los objetos dependió, en buena medida, de su masa.

El sistema solar cobra forma

El Sol, que se quedó con la mayor parte de la masa del sistema solar, lo domina todo. Nuestro sistema no es de los más masivos, y el Sol es una estrella más bien modesta, lo cual re-

sulta muy conveniente para un planeta viviente cercano. Paradójicamente, mientras más masiva sea una estrella, más corta será su vida. Las temperaturas y las presiones interiores de las estrellas grandes, proporcionalmente elevadas, producen reacciones de fusión nuclear más y más rápidas. Así, una estrella diez veces más masiva que nuestro Sol puede durar una décima parte, a lo más unos cuantos cientos de millones de años, que no es tiempo suficiente para que un planeta que la orbite desarrolle vida antes de que la estrella explote en forma de una supernova asesina. Por el contrario, una enana roja con una décima de la masa del Sol durará diez veces más —cien mil millones de años o más—, aunque la emisión de energía de una estrella tan débil puede no ser tan adecuada para mantener la vida como la de nuestro benefactor amarillo.

Nuestro Sol es un agradable término medio: no es tan grande como para tener una vida corta ni demasiado pequeño y frío. Y con unos nueve o diez mil millones de años de vida productiva quemando hidrógeno, ha proporcionado bastante tiempo para que la vida arranque, y todavía hay suficiente para que siga evolucionando. Es cierto que en unos cuatro o cinco mil millones de años el Sol agotará el hidrógeno de su núcleo y tendrá que comenzar a quemar helio. En el proceso se hinchará hasta convertirse en una gigante roja mucho menos benigna, con un diámetro cien veces mayor que el actual, y se tragará primero al pobre Mercurio, luego incendiará y devorará Venus y también hará que las cosas en la Tierra se pongan incómodas. Por suerte, tras 4500 millones de años todavía falta mucho tiempo para que el Sol se convierta en un viejito malhumorado y la vida en la Tierra se vuelva problemática.

Nuestro sistema solar posee otra ventaja importante para un planeta viviente. A diferencia de muchos otros, el nuestro es un sistema uniestelar. Los astrónomos, con ayuda de telesco-

pios muy poderosos, han encontrado que aproximadamente dos terceras partes de las estrellas que vemos en el cielo nocturno en realidad pertenecen a sistemas binarios, en los que dos estrellas se orbitan mutuamente en un baile en torno a un centro común de gravedad. Al formarse esas estrellas, el hidrógeno se acumuló en dos lugares separados para formar gigantescas bolas de gas.

Si nuestra nebulosa hubiera sido un poquito más espiral, con más momento angular y, por lo tanto, más masa allá por la región de Júpiter, nuestro sistema solar probablemente habría terminado siendo un sistema binario también. El Sol habría sido más pequeño y Júpiter, en vez de convertirse en un gran planeta rico en hidrógeno, habría crecido hasta convertirse en una pequeña estrella rica en hidrógeno. Tal vez la vida habría podido prosperar en medio de esta polaridad. Tal vez una estrella extra nos habría provisto con una fuente extra de energía para la vida. Pero las dinámicas gravitacionales de dos estrellas pueden ser intrincadas, de modo que la Tierra podría haber terminado siendo un mundo hostil para la vida con una órbita excéntrica, una rotación tambaleante y cambios climáticos violentos provocados por las dos atracciones gravitacionales opuestas.

Por suerte, los planetas gaseosos gigantes, con su tamaño modesto y sus órbitas casi circulares alrededor del Sol, se comportan bastante bien. Júpiter, el más grande del grupo, alcanza poco menos que una milésima parte de la masa del Sol. Eso es suficiente para ejercer un control bastante importante sobre sus vecinos planetarios; gracias a las perturbaciones que produce su campo gravitacional los planetésimos que forman el Cinturón de asteroides nunca se han juntado para formar un planeta. Pero Júpiter no es lo suficientemente grande para desatar reacciones de fusión nuclear en su propio núcleo, que

es la diferencia fundamental entre las estrellas y los planetas. Saturno, con su anillo, y los helados Urano y Neptuno, son aún más pequeños.

Y sin embargo, todos estos gigantescos planetas gaseosos fueron lo suficientemente grandes para capturar sus propios discos de desechos mediante su campo gravitacional, como si fueran pequeños sistemas solares dentro de uno más grande. Por ello, los cuatro planetas exteriores tienen sus propios conjuntos de lunas fascinantes, incluyendo algunos asteroides relativamente pequeños que fueron atraídos y mantenidos en órbita por la gravedad de los gigantes. Otras lunas, algunas casi tan grandes como los cuatro planetas interiores y con sus propios procesos geológicos dinámicos, se formaron más o menos en su lugar a partir de polvo y gas sobrantes, los detritos de la construcción planetaria. De hecho, el objeto más activo en el sistema solar es Io, una luna de Júpiter que está tan cercana a su enorme planeta que lo orbita una vez cada 41 horas. Las colosales fuerzas de marea estresan constantemente los 3637 kilómetros de diámetro de la luna y le proporcionan energía a media docena de volcanes que emiten penachos de azufre que se extienden más de 160 kilómetros sobre la superficie, algo inédito en el sistema solar. Igual de intrigantes resultan Europa y Ganímedes, lunas casi tan grandes como Mercurio y compuestas por cantidades casi iguales de agua y roca. Las incesantes fuerzas de marea de Júpiter las mantienen tibias, gracias a lo cual poseen océanos profundos y envolventes, cubiertos por una capa de hielo. Ambas son un objetivo de la NASA, como parte de su incesante búsqueda de vida en otros mundos.

Saturno, el siguiente planeta contando desde el Sol, está dotado con casi dos docenas de lunas, por no hablar de un glorioso sistema de anillos dominado por pequeños fragmen-

tos de hielo de agua muy reflectantes. Casi todas las lunas de Saturno son relativamente pequeñas; algunas son asteroides capturados y otras se formaron a partir de los restos gaseosos del planeta. Pero su luna más grande, Titán, es mayor que Mercurio y está ahogada en una densa atmósfera anaranjada. Gracias a la sonda *Huygens*, enviada por la Agencia Espacial Europea y que aterrizó el 14 de enero de 2005, tenemos acercamientos de la dinámica superficie de Titán. Existen complejas redes de ríos y arroyos que alimentan lagos congelados de hidrocarburos líquidos; la atmósfera, densa, colorida y turbulenta, está espolvoreada de moléculas orgánicas. Titán es otro de los mundos en los que se buscan señales de vida.

Los más lejanos de los gigantes gaseosos, Urano y Neptuno, no le piden nada a los demás en cuanto a surtido de lunas interesantes. La mayor parte muestra señales de hielo de agua, moléculas orgánicas y una continua actividad dinámica. Y tanto Urano como Neptuno tienen sus propios sistemas complejos de anillos, aunque parecen estar compuestos por trozos tan grandes como automóviles de algún material oscuro y rico en carbono, muy distinto a las partículas luminosas que forman los helados anillos de Saturno.

Mundos rocosos

Más cerca de casa, la gravedad también hizo de las suyas. Como la mayor parte del hidrógeno y el helio salieron disparados hacia el reino de los gigantes gaseosos tras la ignición del Sol, el sistema solar interior tenía mucha menos masa para jugar, y la mayor parte consistía en rocas duras, la materia que forma las condritas y las acondritas. Mercurio, el planeta rocoso más pequeño y seco, es también el que se formó más cerca

del Sol. Este mundo interior, hostil y chamuscado, parece estar muerto y maltrecho: su superficie llena de cráteres ha sido preservada, durante miles de millones de años, por un cielo sin aire. Si alguna vez te piden que apuestes por un lugar del sistema solar en el que no hay vida, Mercurio debería ser tu primera elección.

Venus, el planeta que sigue, es idéntico a la Tierra en tamaño, pero radicalmente diferente en habitabilidad, gracias en buena medida a su órbita, que se encuentra casi cincuenta millones de kilómetros más cerca del Sol. Es posible que al principio haya tenido una pequeña cantidad de agua, tal vez incluso un océano poco profundo, pero la mayor parte del agua venusina parece haberse evaporado a causa del calor del Sol y del viento solar. El dióxido de carbono, el gas dominante en la espesa atmósfera venusina, atrapó la energía radiante del Sol y creó un efecto invernadero descontrolado. Hoy las temperaturas promedio en la superficie de Venus superan los 500 grados Celsius, suficiente para derretir el plomo.

Marte, una parada más allá de la Tierra, es mucho más pequeño que nuestro planeta, con apenas una décima parte de su masa, pero en muchos sentidos es el más terrícola de todos nuestros vecinos. Igual que los otros planetas rocosos, Marte tiene un núcleo metálico y un manto de silicatos y, como la Tierra, posee una atmósfera y mucha agua. Su gravedad es relativamente débil y no puede detener las moléculas de gas que viajan rápidamente en la atmósfera superior, así que a lo largo de miles de millones de años ha perdido mucho aire y agua, a pesar de lo cual Marte conserva depósitos subterráneos tibios en los que la vida podría tener un último refugio. Con razón la mayor parte de las misiones espaciales tienen como objetivo el planeta rojo.

La Tierra misma, «el tercer planeta», está justo en medio de la zona habitable que los científicos llaman «Ricitos de Oro». Está lo suficientemente cerca del Sol, y lo suficientemente caliente, como para haber expulsado cantidades importantes de hidrógeno y helio a las regiones externas del sistema solar, pero lo suficientemente lejos del Sol, y lo suficientemente templado, como para conservar la mayor parte de su agua en forma líquida. Como los otros planetas en el sistema solar, se formó hace unos 4500 millones de años, básicamente a partir de condritas que chocaban y cuyas crecientes fuerzas gravitacionales las convirtieron, a lo largo de unos cuantos millones de años, en planetésimos más y más grandes.

Tiempo profundo

Toda la evidencia con la que contamos sobre el nacimiento del Sol, la Tierra y el resto de nuestro sistema solar implica comprender enormes lapsos de tiempo: 4500 millones de años y contando. A los estadounidenses nos encanta citar las fechas de algunos eventos famosos en la historia de la humanidad. Celebramos grandes hazañas y descubrimientos, como el primer vuelo de los hermanos Wright, el 17 de diciembre de 1903, y el aterrizaje de la primera misión tripulada a la Luna, el 20 de julio de 1969. Conmemoramos los días en los que ocurrieron tragedias y pérdidas nacionales, como el 7 de diciembre de 1941[1] y el 11 de septiembre de 2001. Y recordamos los cumpleaños: el 4 de julio de 1776[2] y, por supuesto, el 2 de febrero de 1809, cumpleaños de Charles Darwin y de Abraham Lincoln. Nos parece que es válido celebrar estos momentos históricos porque existe un registro escrito y oral

ininterrumpido que nos vincula con ese pasado no tan distante.

A los geólogos también les encantan las marcas del tiempo histórico: hace unos 12 500 años, cuando terminó la última gran glaciación y los humanos comenzaron a poblar América del Norte; hace 65 millones de años, cuando se extinguieron los dinosaurios y muchas otras criaturas; el límite Cámbrico, hace 530 millones de años, cuando apareció de pronto una gran diversidad de animales con caparazones duros, y hace más de 4500 millones de años, cuando la Tierra se convirtió en un planeta en órbita alrededor del Sol. Pero ¿cómo sabemos si esos cálculos son correctos? No existen registros escritos, ni tradiciones orales, sobre la cronología de la Tierra, más allá de unos pocos miles de años.

Cuatro mil quinientos millones de años es un número casi imposible de entender. El récord Guiness actual de longevidad lo detenta una francesa que vivió para celebrar su cumpleaños 122, así que los humanos no conseguimos vivir ni siquiera 4500 millones de segundos (unos 144 años). Toda la historia humana de la que se tiene registro dura mucho menos de 4500 millones de minutos. Y los geólogos se atreven a asegurar que la Tierra ha existido por más de 4500 millones de años.

No hay una forma sencilla de comprender este *tiempo profundo*, pero a veces lo intento emprendiendo largas caminatas. Al sur de Annapolis, Maryland, se extienden unos treinta kilómetros de acantilados ondulantes y llenos de fósiles que flanquean la costa oeste de la bahía de Chesapeake. Si recorres el delgado camino de arena entre la tierra y el agua puedes encontrar montones de almejas, conchas espirales, corales y galletas de mar extintos. De vez en cuando, si tienes mucha suerte, aparecerá un diente de tiburón de quince centímetros y

con las orillas aserradas, o un aerodinámico cráneo de ballena de dos metros de largo. Estas valiosas reliquias cuentan la historia de una época, hace quince millones de años, cuando la región era más cálida y tropical, como la isla de Maui hoy, y había majestuosas ballenas que venían a parir a sus aguas y monstruosos tiburones de veinte metros de largo que se daban un banquete con los animales más débiles. Los fósiles ocupan cien metros de sedimentos verticales que se depositaron allí durante tres millones de años de historia de la Tierra. Las capas de arena y marga se inclinan apenas hacia el sur, así que caminar por la playa es como pasear por el tiempo. Cada paso hacia el norte expone estratos un poco más antiguos.

Para tener una idea de la escala de la historia de la Tierra, imagínate que caminas hacia atrás en el tiempo; cada paso representa cien años atrás, lo mismo que tres generaciones humanas. Una milla te lleva 175 mil años en el pasado. Los poco más de 32 kilómetros de acantilados de Chesapeake, un largo día de caminata, corresponden a más de tres millones de años. Pero para dejar aunque sea una pequeña marquita en la historia de la Tierra, tendrías que seguir caminando a ese paso durante muchas semanas. Veinte días de esfuerzos, a 32 kilómetros por día, y cien años por paso, te llevarían 70 millones de años en el pasado, justo antes de la extinción masiva de los dinosaurios. Cinco meses de caminatas de 32 kilómetros al día corresponderían a más de 530 millones de años, la época de la «explosión» del Cámbrico, cuando surgieron, de forma más o menos simultánea, miles de animales con caparazón duro. Pero a un ritmo de cien años por paso tendrías que caminar casi *tres años* para alcanzar los comienzos de la vida, y casi *cuatro años* para llegar al nacimiento de la Tierra.

¿Cómo podemos saberlo? Los científicos que estudian el planeta han desarrollado muchas líneas de evidencia que

apuntan a una Tierra increíblemente vieja, al tiempo profundo. La evidencia más sencilla se encuentra en los fenómenos geológicos que producen la deposición anual de material: si cuentas los estratos, cuentas los años. Los calendarios geológicos más espectaculares son los depósitos de varva: capas delgadas de estratos claros y oscuros alternados que representan los sedimentos más gruesos del verano y los sedimentos más finos del invierno, respectivamente. En los lagos glaciales de Suecia puede verse una secuencia, meticulosamente documentada, que registra 13 527 años de estratos, y cada año se deposita una nueva capa bicolor. Los delgados esquistos laminados de Green River, que están expuestos en los espectaculares y escarpados cañones de Wyoming, muestran secciones verticales continuas con más de un millón de capas anuales. De forma similar, los núcleos de hielo de miles de metros de profundidad extraídos de la Antártida y de Groenlandia revelan más de 800 mil años de acumulación, año con año, capa de nieve tras capa de nieve. Todas estas capas descansan sobre rocas muchísimo más antiguas.

Para medir procesos geológicos más lentos debemos retrasar aún más el reloj de la historia de la Tierra. Las enormes islas hawaianas se formaron gracias a una actividad volcánica muy lenta y continua que produjo que se apilaran sucesivas capas de lava durante al menos decenas de millones de años, si nos basamos en las tasas modernas de erupción. Los Apalaches y otras cordilleras montañosas redondeadas adquirieron su forma gracias a cientos de millones de años de erosión gradual, y los movimientos, casi imperceptibles, de las placas tectónicas que han movido continentes y abierto océanos, también operan en ciclos de cientos de millones de años.

La física y la astronomía nos muestran evidencias del tiempo profundo igualmente convincentes. Las tasas de decai-

miento radiactivo de los isótopos del carbono, uranio, potasio, rubidio y otros elementos pueden predecirse con exactitud y funcionan como relojes excepcionalmente precisos para datar eventos de formación de roca que se remontan a miles de millones de años atrás, al nacimiento mismo del sistema solar. Si tienes una colección de un millón de átomos de un isótopo radiactivo, la mitad decaerá en un lapso de tiempo llamado *vida media*. Si dejas por ahí un millón de átomos de uranio-238, por ejemplo, y vuelves cuando haya transcurrido su vida media de 4468 millones de años, encontrarás que sólo queda medio millón de átomos de uranio-238. El resto del uranio habrá decaído en medio millón de átomos de otros elementos, hasta llegar finalmente a los átomos de plomo-206, que son estables. Si esperas otros 4468 millones de años sólo quedará un cuarto de millón de átomos de uranio. Para determinar la edad de las condritas primitivas más antiguas —4566 millones de años— se usa este método de datación radiométrica.

Pero ¿qué hay de los muchos miles de millones de años que transcurrieron *antes* del sistema solar? Las medidas astrofísicas de las lejanas galaxias en movimiento apuntan a un universo que es mucho más viejo que 4500 millones de años. Todas las galaxias se alejan de nosotros a gran velocidad. Los datos de los desplazamientos Doppler —también llamados *desviación al rojo*— revelan que las galaxias más distantes se alejan aún más rápido. Si proyectaras la película cósmica en reversa todo convergiría en un solo punto, hace unos 13 700 millones de años. Es el *Big Bang*. La luz de algunos de los objetos más distantes que hemos visto ha estado viajando por el espacio por más de 13 mil millones de años.

Estos datos son irrefutables. Cualquiera que diga que la edad de la Tierra es de diez mil años o menos desafía la evidencia observacional, abrumadora e inequívoca, de todas las

ramas de la ciencia. La única alternativa es que el cosmos fue creado hace diez mil años de modo que pareciera mucho más antiguo, una conclusión que expuso por primera vez el naturalista estadounidense Philip Gosse en 1857, en su difícil tratado *Omphalos* (bautizado así por la palabra griega que significa «ombligo», porque Adán, que no tuvo madre, fue creado con ombligo para que pareciera que nació de una mujer). Gosse catalogó cientos de páginas de evidencia de una Tierra extremadamente antigua y luego se puso a describir cómo Dios creó todo hace diez mil años para que *se viera mucho más antiguo*.

Tal vez a algunos les parezca tranquilizador el tecnicismo creacionista que asegura que las cosas fueron creadas para parecer antiguas, conocido como *precronismo*. A las observaciones de los astrofísicos, que muestran que las galaxias se encuentran a miles de millones de años luz de distancia, los precronistas responden que cuando el universo fue creado la luz de estas estrellas y galaxias ya viajaba en dirección a la Tierra. Aseguran que las rocas con tasas antiguas de isótopos radiactivos y sus derivados se crearon con la mezcla justa de uranio, plomo, potasio y argón para que *parecieran* mucho más antiguas de lo que realmente son. Si crees en el precronismo te sugiero que saltes al capítulo 11, «El futuro». Si no, deja que tu imaginación te lleve miles de millones de años atrás, al momento en el que nació nuestro planeta.

El nacimiento de la Tierra, hace 4500 millones de años, fue un drama que se ha repetido incontables billones de veces durante la historia del universo. Cada estrella y cada planeta surgen en el espacio casi vacío a partir de gas y polvo, partículas individuales de materia demasiado pequeñas para verlas a simple vista, pero tan grandes en extensión que podemos observar, desde el otro lado de la galaxia, enormes nubes en las que

están naciendo las estrellas. Hace miles de millones de años la gravedad sirvió como la partera en el nacimiento del sistema solar. El Sol emergió como el gigante solitario entre una camada de pigmeos planetarios. Las reacciones nucleares incendiaron la superficie del Sol y bañaron a sus vecinos planetarios en luz y calor. Y así nuestro hogar dio sus primeros pasos vacilantes para convertirse en un mundo viviente.

Estos eventos épicos pueden parecernos de lo más ajenos, pero todos experimentamos, durante cada día de nuestra vida, los mismos fenómenos cósmicos que condujeron a la formación de la Tierra. Los mismos elementos y átomos que forjaron la Tierra constituyen nuestros cuerpos y nuestros entornos. La misma fuerza universal de la gravedad que dio forma a las estrellas y a los planetas a partir de gas y polvo, y que forjó los elementos dentro de los hornos de las estrellas, es la que nos mantiene unidos a nuestro hogar planetario. Cuando se trata de las leyes universales de la física y la química, no hay nada nuevo bajo el Sol.

Las lecciones que nos enseñan las rocas, las estrellas y la vida son igual de claras. Para entender la Tierra tienes que divorciarte de la escala temporal y espacial de la vida humana, igualmente intrascendentes. Vivimos en un mundito diminuto, en un cosmos de cien mil millones de galaxias, cada una con cien mil millones de estrellas. Vivimos día a día en un cosmos que tiene cientos de miles de millones de días de edad. Si buscas sentido y propósito en el cosmos seguro que no lo encontrarás en ningún lugar o momento especial vinculado con la existencia humana. Las escalas de espacio y de tiempo son inconcebiblemente grandes. Pero un cosmos regido por las leyes naturales conduce inevitable e inexorablemente, a un universo que promete la posibilidad de conocerse a sí mismo,

y que es, como sugiere por su misma naturaleza el estudio científico, un cosmos repleto de significado.

EDAD DE LA TIERRA (miles de millones de años)

0	1	2	3	4	4-5,6,7
	Eón Hadeano	*Eón Arqueano*	*Eón Proterozoico*	*Eón Fanerozoico*	

↑

Capítulo 2

El Gran Impacto

La formación de la Luna

Edad de la Tierra: de 0 a aproximadamente 50 millones de años

Uno de los principios centrales de este libro es que los sistemas planetarios evolucionan: cambian a lo largo del tiempo. Es más, cada nueva etapa evolutiva depende de una secuencia previa de etapas. Los cambios suelen ser graduales. Cambiar el medio ambiente de un planeta puede tomar miles o incluso miles de millones de años, pero también ocurren cambios violentos, súbitos e irreversibles que pueden alterar un mundo en minutos y para siempre. Así ocurrió con la Tierra.

La Tierra se formó relativamente rápido, en no más de un millón de años según ciertos cálculos, a partir de una infinidad de partículas. Hacia el final de este proceso la proto-Tierra compartía espacio con unas cuantas docenas de planetésimos, cada uno de varios cientos de kilómetros de diámetro. En un lapso de unos cien mil años, conforme nuestro planeta se aproximaba a su tamaño definitivo, las últimas etapas de este proceso tuvieron lugar en episodios de una violencia inconcebible. Cada tantos miles de años uno de los miniplanetas se

estrellaba en la proto-Tierra y era tragado por completo por ésta.

Durante esos tiempos turbulentos, la Tierra era una esfera caliente y ennegrecida, cruzada por grietas incandescentes, enormes fuentes de magma e incesantes impactos de meteoritos. Cada uno de los cuerpos que chocaban contra esta esfera lanzaba en órbita rocas vaporizadas y convertía la superficie completa en un charco de roca al rojo vivo. Pero el espacio es frío. Tras cada impacto la superficie de la Tierra, por entonces carente de aire, pronto se enfriaba y volvía a ennegrecerse.

Una Luna extraña

Esta historia sobre los orígenes de la Tierra parece muy clara y sencilla, excepto por un detalle extraordinario: la Luna. Es demasiado grande para ignorarla, y durante buena parte de los últimos dos siglos su existencia ha resultado muy difícil de explicar. Las lunas pequeñas son fáciles de entender. Fobos y Deimos, las dos rocas irregulares, del tamaño de una ciudad, que orbitan Marte, parecen ser asteroides capturados. Las docenas de lunas mucho más grandes que orbitan Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, con mucho menos que una milésima parte de la masa de los planetas que orbitan, son diminutas en comparación con sus anfitriones. Las lunas más grandes, que se formaron a partir de los restos del polvo y el gas que dieron origen a los planetas, orbitan a estos gigantes gaseosos como si fueran planetas de un sistema solar en miniatura. La luna de la Tierra, por el contrario, es inmensa en comparación con el planeta que orbita: tiene más de una cuarta parte del diámetro de la Tierra y aproximadamente una octogésima parte de su masa. ¿De dónde viene ésta anomalía?

Las ciencias históricas, en particular las ciencias de la Tierra y los planetas, dependen de una narración creativa (aunque por regla las historias contadas tienen que adaptarse más o menos bien a los hechos). Si hay más de una historia que parece ajustarse a las observaciones, los geólogos adoptan una cautelosa postura conocida como «múltiples hipótesis de trabajo», una estrategia que cualquiera que disfrute las novelas de detectives conocerá bien.

Antes de los famosos alunizajes del *Apolo*, que comenzaron en 1969 y a partir de los cuales pudieron recolectarse rocas lunares intactas y empezaron a tomarse cuidadosas mediciones geofísicas del interior de la Luna, existían tres sospechosos principales en el Caso de la Luna Gigante. La primera hipótesis científica ampliamente aceptada fue la teoría de la fisión, que propuso, en 1878, George Howard Darwin (menos famoso que su padre, el naturalista Charles Darwin). En la hipótesis de George Darwin la Tierra primordial, en su estado líquido, giraba tan rápido sobre su eje que se estrechó y elongó hasta que una esfera de magma se separó de la superficie y entró en órbita (con un poco de ayuda del empuje gravitacional del Sol). En este modelo la Luna es un brote de la Tierra que se escapó. Hay una variante muy imaginativa de esta dramática historia que sostiene que la cuenca del Pacífico constituye una marca que delata este evento: una cicatriz del parto de la Tierra.

Hay una segunda teoría que compite con la anterior, la teoría de la captura, que sugería que la Luna es un planetésimo que se formó aparte y que ocupaba más o menos el mismo código postal que la Tierra durante la formación del sistema solar. En algún momento ambos cuerpos pasaron tan cerca que la Tierra, más grande, capturó a la Luna y la lanzó a una órbita circular que se ha ido estabilizando con el tiempo. Este vo-

raz mecanismo gravitacional parecía funcionar bien para las pequeñas lunas rocosas de Marte, ¿así que por qué no también para la Tierra?

La tercera hipótesis, la teoría de la acreción binaria, proponía que la Luna se formó más o menos en su ubicación actual a partir de una gran nube de restos que permanecieron en órbita alrededor de la Tierra. Esta idea, bastante verosímil, reproduce lo que conocemos sobre el Sol y sus planetas, así como sobre los gigantes gaseosos y sus lunas. Es un tema común que vemos aparecer una y otra vez por todo el sistema solar: los objetos más pequeños se agregan a partir de nubes de polvo, gas y rocas alrededor de objetos más grandes.

Tres hipótesis en competencia. ¿Cuál es la correcta? Para saberlo las mentes curiosas tuvieron que esperar a que llegaran los datos de las rocas lunares, más de 381 kilogramos de muestras provenientes de los seis sitios de alunizaje del *Apolo*.

Arribo a la Luna

Las misiones lunares *Apolo* transformaron de muchas formas la ciencia planetaria. Por supuesto, fueron una propaganda inmejorable sobre las proezas tecnológicas y la fanfarronería estadounidenses. Sin duda representaron un impulso tremendo a la dupla militar-industrial, e inspiraron innumerables innovaciones, desde las minicomputadoras a los polímeros y al Tang, y con ello constituyeron un catalizador económico que debe haber pagado muchas veces los veinte mil millones de dólares que costaron las misiones. No es de sorprender que fueran el orgullo nacional y la carrera por «llegar a lo más alto», y no la ciencia lunar, los incentivos principales para enviar las primeras misiones a la Luna, tan caras y peligrosas.

Como sea, es difícil exagerar el tamaño del impacto que tuvieron, para mi generación de científicos de la Tierra, las misiones *Apolo* y su cofre del tesoro lleno de rocas lunares. Durante toda la historia de la humanidad la Luna estuvo seductoramente cerca, a no más de 400 mil kilómetros de distancia. En las tardes claras de verano, cuando se asoma por el horizonte esa Luna rojiza, sientes que si extiendes la mano podrás tocarla. Pero no teníamos ninguna muestra, nada que nos dijera de qué estaba hecha la Luna, ni cuándo, ni dónde. Con la primera tanda de muestras lunares pudimos, por primera vez en la historia de la humanidad, literalmente tocar la Luna (y lo mismo pueden hacer hoy los visitantes del Smithsonian).

Mi primera bocanada de muestras lunares ocurrió en el invierno de 1969-1970, durante mi último año en el MIT, menos de medio año después de las misiones históricas del *Apolo 11*. Las cosas comenzaron unos pocos meses antes, el 24 de julio de 1969, cuando los primeros humanos que caminaron sobre la Luna volvieron a la Tierra. En esos primeros días de exploración especiales existían políticas muy estrictas de cuarentena para los astronautas y para sus muestras, por miedo a la contaminación por microbios extraterrestres. Así que en cuanto el módulo cayó en el Pacífico, cerca de Hawai, y tan pronto como el USS *Hornet* recogió a Neil Armstrong, Buzz Aldrin y Mike Collins, ellos y los veinte kilos de rocas y suelo invaluables que habían traído del espacio fueron sellados herméticamente en la Instalación Móvil de Cuarentena de la NASA. De Hawai los llevaron a Houston, al nuevo Laboratorio de Recepción Lunar, donde los exploradores espaciales y sus muestras estuvieron confinados durante tres semanas, en caso de que se hubieran traído del espacio algún bicho desagradable.

Las misiones *Apolo* se sucedieron rápidamente durante los tres años siguientes. El módulo lunar del *Apolo 12*, *Intrepid*, que llevaba a los astronautas Charles Conrad Jr. y Alan Bean, alunizó el 19 de noviembre de 1969, y regresó una semana después con unos treinta kilos de suelo y rocas lunares, que fueron confinadas a las instalaciones de cuarentena en Houston. Por pura suerte mi asesor de tesis, el brillante y entusiasta David Wones, era miembro del Equipo de Investigación Preliminar de Muestras Lunares del *Apolo 12*. Ese pequeño equipo de científicos vivieron la gloriosa aventura de escudriñar el segundo botín de muestras lunares con un arsenal de equipos analíticos de última generación. Dave era experto en petrología ígnea, el estudio de los orígenes de las rocas que se forman a partir del magma. Todas las rocas lunares del *Apolo 11* y *12* eran de origen ígneo, así que se encontraba en el cielo de los geólogos.

En cierto sentido era un trabajo bastante arduo, eso de estar encerrado durante casi todo un mes con un puñado de científicos apasionados, trabajando bajo una enorme presión para obtener datos irrefutables a partir de algunas de las muestras de roca más costosas e importantes jamás recolectadas. Pero también era increíblemente excitante estar entre los primeros humanos en manipular rocas y suelo de otro mundo, el material espacial que nos revelaría, de una vez por todas, el origen de la Luna.

Mi primer encuentro cara a cara con la Luna ocurrió cuando Dave regresó al MIT. Recuerdo que la puerta del elevador se abrió en el piso doce del Edificio Verde, y ahí estaba Dave, no muy alto y con lentes, flanqueado por dos agentes federales musculosos, uniformados y armados. Su trabajo era cuidar las muestras lunares, que en ese momento debían valer millones de dólares en el mercado de los coleccionistas. Había que dar

cuenta de cada miligramo. Dave se veía cansado y nervioso; había estado fuera por mucho tiempo, se encontraba bajo supervisión permanente y todavía tenía que hacer su trabajo.

Cuando sale a colación el tema de las muestras lunares la gente se imagina de inmediato rocas lunares, por ejemplo un trozo que puedes sostener en la mano. Pero una parte importante del material del *Apolo* era suelo lunar, o regolito. La parte más fina del regolito es roca pulverizada en fragmentos tan pequeños que no puedes verlos en el microscopio, a consecuencia de una larga historia de violencia cósmica, desde enormes asteroides hasta el incesante viento lunar. Este ultrapolvo tiene propiedades extrañas, la principal de las cuales es que se le pega a todo lo que toca, como si fuera tóner de impresora. El trabajo de Dave era transferir parte de este polvo desde un contenedor del tamaño de una pila C a tres o cuatro frascos del tamaño de pilas AAA, para poder distribuirlo a laboratorios cercanos.

Suena bastante fácil. Echas el polvo del frasco grande en un pedazo de un papel para polvo, de superficie muy lisa y de unos ocho centímetros de lado. Con mucho cuidado, vacías un poco en los frasquitos. Dave había hecho operaciones parecidas cientos de veces, y no debería haberle tomado más de un minuto. Pero aquí había mucho en juego. A cada lado tenía parado un guardia sin mucho sentido del humor, y también lo rondaba un pequeño séquito de estudiantes. Así que las manos de Dave temblaron un poco cuando inclinó el frasco grande. El polvito pegajoso se agarró de las paredes de vidrio y no quiso salir. Le dio unos golpecitos con el dedo índice. Nada. Más golpecitos.

Entonces, todo el polvo lunar —que en realidad no era más que un montoncito del tamaño de un chocolate Kiss, pero que parecía más en estas circunstancias— cayó de golpe, y ¡puf! El

polvo voló, cubrió los dedos de Dave y se desparramó sobre la orilla del papel y por la mesa. Seguro que todos inhalamos algunas de las partículas más finas, que volaron por el aire. Nadie dijo nada.

Por suerte no ocurrió ningún desastre: no se perdió casi nada, el polvo eventualmente fue transferido a su lugar correcto y los guardias federales se fueron a dejar las alícuotas a otros laboratorios. Ahora que lo pienso, a todos nos pareció bastante gracioso. Un par de días después, sobre la banca de laboratorio en donde se había hecho la transferencia colgamos, enmarcado, el cuadrito de papel de polvo con una impresión casi perfecta del dedo índice de Dave Wone en polvo lunar.

A esta misión del *Apolo* le siguieron cuatro alunizajes más, que terminaron en 1972 con el *Apolo 17* y el regreso de más de cien kilogramos de muestras del valle Taurus Littrow, una región en la que se sospechaba que existía vulcanismo lunar. Ésa fue la última misión; nadie ha regresado en décadas. Pero las rocas lunares, meticulosamente guardadas en bóvedas estériles en el Edificio de Muestras Lunares en el Centro Espacial Johnson de la NASA en Houston (y en una colección de respaldo en la Base Brooks de la Fuerza Aérea, en San Antonio, Texas), siguen proporcionando una asombrosa cantidad de investigación.

Unos años después de la última misión *Apolo* esas muestras me dieron mi primer trabajo de verdad, como miembro posdoctoral del Laboratorio de Geofísica del Instituto Carnegie. Mi trabajo era estudiar pilas de «finos» del *Apolo 12*, el *Apolo 17* y *LUNA 20* (una de las tres misiones soviéticas no tripuladas, que trajo unos cien gramos de muestras lunares). El fino polvo lunar está mezclado con granos de mayor tamaño, y mi

difícil misión era revisar miles de estos granos, uno por uno. Pasé horas en el microscopio, viendo de cerca hermosos cristales verdes y rojos y diminutas esferas doradas de vidrio de colores, restos de rocas que fueron hechas añicos durante miles de millones de años de violentos choques con meteoritos.

Una vez que aislaba unas pocas docenas de partículas prometedoras, sometía cada grano que me parecía inusual a tres tipos de análisis. El primero era la difracción de rayos X de monocristal, para saber de qué clase de cristal se trataba. La mayor parte de mis estudios se concentraban en minerales comunes, como la olivino, el piroxeno y la espinela. Si encontraba un buen cristal orientaba con cuidado el grano y medía su espectro de absorción de luz (la forma en la que penetran los diferentes espectros de luz). Los cristales verdes de olivino, por ejemplo, suelen absorber las longitudes de onda rojas; los cristales rojos de espinela, por el contrario, absorben más en las longitudes verdes. También medí los espectros de todos los granos de cristal raros que encontré, en busca de los característicos bultos e irregularidades en el espectro de absorción que indican la presencia de elementos más raros, por ejemplo, cromo o titanio. Uno de mis memorables momentos de «eureka» fue cuando descubrí un pequeño pico a los 625 nanómetros, una ligera absorción de las longitudes de onda rojo-naranjas, característica del elemento cromo tal como se presenta en la Luna pero muy diferente al cromo de la Tierra.

Para terminar, una vez que concluí el trabajo con rayos X y con microscopios ópticos, usé una elegante máquina analítica llamada microsonda de electrones para determinar la proporción exacta de los elementos de mi muestra. Y confirmé, una y otra vez, lo que los demás habían hallado: los minerales de la superficie de la Luna, si bien son similares a los de la Tierra en lo que respecta a los elementos principales, son bastante di-

ferentes en los detalles. Tienen más titanio, y el cromo también es diferente.

Estas y otras pistas de las rocas del *Apolo* limitaron drásticamente las diversas teorías sobre el origen de la Luna. Para empezar, resultó que ésta tiene una densidad dramáticamente menor que la Tierra, pues no posee un núcleo grande y denso de hierro metálico. El núcleo terrestre contiene casi una tercera parte de la masa del planeta, pero el diminuto núcleo de la Luna contiene menos de tres por ciento. En segundo lugar, las rocas lunares casi no contienen rastros de los elementos más volátiles, los que tienden a vaporizarse en cuanto hace un poco de calor. El nitrógeno, el carbono, el azufre y el hidrógeno, tan comunes en la superficie de la Tierra, están ausentes en el polvo lunar. Esta deficiencia significa que, a diferencia de la Tierra, que está cubierta de agua líquida y cuyos suelos contienen muchos minerales ricos en agua, como arcillas y micas, las misiones *Apolo* no trajeron ningún material que contuviera ni pizca de agua. Algo debe haber eliminado esos compuestos volátiles de la Luna; tal vez un choque o una explosión convirtieron su superficie en el lugar seco y desolado que es hoy.

El tercer hallazgo clave de las misiones *Apolo* tiene que ver con el elemento oxígeno, o más específicamente con la distribución de sus isótopos. Cada elemento químico está definido por el número de protones, cargados positivamente, que hay en su núcleo. Ese número es único: *oxígeno* sólo es otra forma de decir «átomo con ocho protones». Los núcleos atómicos también contienen una segunda clase de partícula, los neutrones, que son eléctricamente neutros. Más de 99.7 por ciento de los átomos de oxígeno del universo tienen ocho neutrones (ocho protones más ocho neutrones producen un isótopo llamado oxígeno-16), mientras que los isótopos con nueve o diez

neutrones (oxígeno-17 y oxígeno-18, respectivamente) representan una pequeña fracción del porcentaje restante.

El oxígeno-16, el oxígeno-17 y el oxígeno-18 tienen un comportamiento químico casi idéntico —puedes respirarlos en cualquier combinación y no notarías la diferencia—, pero poseen masas distintas. El oxígeno-18 es más pesado que el oxígeno-16. Por lo tanto, cada vez que un compuesto que contiene oxígeno cambia su estado de sólido a líquido, o de líquido a gas, el oxígeno-16, menos masivo, puede moverse más fácilmente. Durante los turbulentos inicios del sistema solar estos cambios eran de los más comunes, y produjeron una alteración en las cantidades de isótopos de oxígeno. Resulta que la proporción de oxígeno-16 y oxígeno-18 cambia de planeta en planeta, y es muy sensible a la distancia a la que se encontraba dicho planeta del Sol cuando se formó. Las rocas del *Apolo* revelaron que las proporciones de isótopos de oxígeno en la Luna son prácticamente idénticas a las de la Tierra. En otras palabras, la Tierra y la Luna deben haberse formado más o menos a la misma distancia del Sol.

¿Qué pasa, entonces, con las tres hipótesis rivales sobre la formación de la Luna? La teoría de la acreción binaria estaba en problemas desde el principio. Si la Luna se formó a partir de sobras de la Tierra, ambas tendrían que tener la misma composición promedio. Es verdad que la Luna y la Tierra coinciden en cuanto a los isótopos de oxígeno, pero la teoría de la acreción binaria no puede explicar las grandes diferencias en hierro y en compuestos volátiles. La composición general de la Luna es demasiado diferente como para que se haya formado a partir de los mismos materiales que la Tierra.

Las diferencias en composición también plantean problemas insalvables para la teoría de la captura. Los modelos teóricos de los movimientos planetarios sugieren que un planeté-

simo capturado debería haberse formado en la nebulosa solar a más o menos la misma distancia del Sol que la Tierra y, por lo tanto, tendría más o menos la misma composición promedio. La Luna no. Claro que podría haberse formado, en otra zona de la nebulosa solar, un objeto del tamaño de la Luna con una órbita que cruzara la de la Tierra, pero los modelos por computadora de las dinámicas orbitales requieren que una luna como ésa tuviera una velocidad muy alta en relación con la de la Tierra, lo que haría que ese escenario de captura resultara imposible.

Así que queda la teoría de la fisión de George Howard Darwin, la cual puede explicar las composiciones similares de isótopos de oxígeno (la Tierra y la Luna son un mismo sistema) y la diferencia de hierro (el núcleo de la Tierra ya se había formado; la masa amorfa que daría origen a la Luna era un trozo del manto de la Tierra, ya diferenciado y pobre en hierro). Además, permite entender por qué siempre vemos la misma cara de la Luna: la órbita de la Tierra y la de la Luna siguen el mismo movimiento de rotación alrededor del eje de la Tierra: giran en el mismo sentido. Pero todavía hay un gran problema: ¿dónde quedaron los compuestos volátiles de la Luna?

Las leyes de la física también presentan algunos inconvenientes para la teoría de la fisión. Más o menos por la misma época en la que se lanzaron las misiones *Apolo*, los modelos por computadora de la formación de planetas habían progresado al punto de que los teóricos podían estudiar con precisión la dinámica de una bola de magma del tamaño de la Tierra que gira a gran velocidad. En una palabra: la fisión no funciona. La gravedad de la Tierra es demasiado fuerte para que una gran masa de roca fundida salga despedida hacia el espacio. De hecho, una Tierra líquida tendría que girar sobre su

eje a una velocidad increíble, más o menos una vez por hora, para que se desprendiera una gota del tamaño de la Luna. El sistema Tierra-Luna no tiene suficiente momento angular para que algo así ocurra.

Conclusión: ninguna de las tres teorías predominantes sobre la formación de la Luna se ajustaba a los datos que obtuvimos de las misiones *Apolo*. Debía haber otra explicación.

El testimonio de las rocas lunares

Los científicos planetarios son grandes narradores. Las observaciones de las misiones *Apolo* refutaron todas las hipótesis previas a 1969 sobre la formación de la Luna, pero no les tomó mucho tiempo inventar una nueva idea a partir de hechos incontrovertibles. Las nuevas pistas que trajo el *Apolo* sobre la composición de la Luna proporcionaron una clave: la Luna se parece más o menos a la Tierra. Tiene la misma composición de isótopos de oxígeno y casi todos los elementos principales, aunque no tiene suficiente hierro y compuestos volátiles. Esos datos tenían que integrarse a las evidencias orbitales que conocemos desde hace miles de años: la Luna orbita la Tierra en el mismo plano y en la misma dirección que los otros planetas alrededor del Sol. La Tierra tiene una irritante inclinación de 23 grados en su eje de rotación (que es lo que provoca las estaciones). Y la Luna siempre nos muestra la misma cara.

Los viejos modelos de la formación lunar tendían a ignorar las evidencias orbitales que se encontraban más allá del sistema Tierra-Luna, incluyendo algunas llamativas excepciones a los patrones generales de nuestro sistema solar. Para empezar, Venus rota sobre su eje en sentido contrario a los otros planetas. Puede no parecer importante, pero Venus es casi tan gran-

de como la Tierra, *¡y gira en sentido contrario!* Urano, el tercer planeta más grande, es aún más raro, pues su eje de rotación está de lado, de modo que parece rodar sobre su órbita alrededor del Sol. También las lunas de los otros planetas tienen sus excentricidades. Tritón, la luna más grande de Neptuno, que es comparable en tamaño a la luna terrestre, orbita en un grado muy inclinado respecto a la rotación de su planeta, y *en la dirección opuesta al resto del sistema solar*.

La cultura científica tiene un rostro un poco raro, que puede desalentar a los que no están en la jugada. Por un lado, se nos ocurren teorías muy buenas que explican muchos hechos curiosos; por ejemplo, que todos los planetas y las lunas orbiten el Sol en la misma dirección y en el mismo plano apunta a que tienen un origen común, a partir de una misma nebulosa. Pero luego encontramos excepciones a esta regla, y las dejamos de lado como meras anomalías curiosas. ¿Que Venus rota en sentido contrario? ¿Que Tritón orbita en sentido contrario? No hay problema. Estas aberraciones son casualidades en el gran esquema de las cosas.

Este tipo de situación complica muchas discusiones públicas, por ejemplo, la del calentamiento global. Muchos científicos predicen que las condiciones atmosféricas perturbadas provocarán que las temperaturas globales promedio aumenten varios grados. Pero estos cambios también producen climas extremos, por ejemplo, grandes tormentas de nieve en el sur de Estados Unidos. El calentamiento global también altera las corrientes oceánicas, por ejemplo la corriente del Golfo, y provoca que el norte de Europa se convierta en una especie de congelador siberiano. Esta clase de anomalías le echa leña a los negacionistas del calentamiento global: los científicos dicen que el mundo se está haciendo más caliente, pero acabamos de pasar la peor tormenta de nieve en la historia de la re-

gión. ¿Cómo responder a esto? Una respuesta sensata es que la naturaleza es sorprendente: rica, variada y compleja, está minuciosamente interconectada y tiene una historia larga y complicada. Las anomalías, ya sea que ocurran en las órbitas planetarias o en el clima de América del Norte, no son sólo detalles inconvenientes por ignorar, sino la esencia misma de la comprensión, los detalles indispensables para entender cómo funcionan las cosas. Desarrollamos modelos amplios y generales sobre cómo funciona la naturaleza, y luego usamos los detalles disímbolos para refinar el modelo original, siempre imperfecto (o, si las excepciones arrinconan a la regla, las reagrupamos alrededor de un nuevo modelo). Por eso los buenos científicos adoran las anomalías. Si lo entendiéramos todo, si pudiéramos predecirlo todo, no tendría sentido levantarse en la mañana para ir al laboratorio.

En el caso del origen de la Luna terrestre, esas excepciones a las tendencias sistemáticas —esas irritantes anomalías orbitales— condujeron al modelo del «Big Splash» o el «Big Thwack» (la «Gran Salpicadura» o el «Gran Impacto»), que surgió a mediados de la década de 1970. Lo que originalmente no era más que un conjunto de hipótesis relacionado pero mal delimitado se convirtió en conocimiento aceptado durante una conferencia crucial que se llevó a cabo en Hawai en 1984, y en la que los expertos en formación planetaria se reunieron para considerar todas sus opciones. En este ambiente tan sesudo prevaleció la «navaja de Ockham», la idea de que la solución más sencilla para un problema —si es consistente con los hechos— es posiblemente la correcta. El Gran Impacto cumplía todos los requisitos.

Para entender esta idea radical, imagínate lo que ocurría hace más de 4500 millones de años, cuando los planetas acababan de formarse a partir de todos los planetésimos rivales.

Para poder alcanzar su diámetro actual, de unos 13 mil kilómetros, la Tierra tuvo que tragarse todos los cuerpos cercanos que quedaban en una sucesión de grandes impactos. Esas penúltimas colisiones con objetos de muchos cientos de kilómetros de largo deben haber sido espectaculares, pero no tuvieron gran efecto en la Tierra, un protoplaneta mucho más masivo.

Pero no todos los impactos son iguales. En la historia de la Tierra se destaca un solo evento, un día más especial que los demás. Hace unos 4500 millones de años, cuando el sistema solar tenía unos cincuenta millones de años, la oscura proto-Tierra y un contrincante planetario un poco más pequeño competían por la misma franja estrecha de sistema solar. El planeta en ciernes (bautizado Theia, por la diosa titán que dio a luz a la Luna) se merecía tener el estatus de planeta, pues era dos o tres veces más grande que Marte y tenía más o menos una tercera parte de la masa de la Tierra. Una regla de la astrofísica es que dos planetas no pueden compartir la misma órbita. Eventualmente chocarán, y el planeta más grande siempre gana. Así ocurrió con la Tierra y Theia.

Los científicos tratan de entender lo que sucedió con ayuda de simulaciones por computadora cada vez más precisas. Los grandes impactos están regidos por las leyes de la física, así que uno puede correr miles de simulaciones con toda clase de situaciones iniciales para ver si producen una luna. La respuesta está íntimamente vinculada con los parámetros iniciales: la masa y la composición de la proto-Tierra, la masa y la composición de Theia, sus velocidades relativas y el ángulo y la precisión del impacto. La mayor parte de las combinaciones no funcionan; no se forma una luna. Pero algunos modelos son sorprendentemente exitosos y producen un sistema Tierra-Luna bastante parecido al que tenemos hoy.

En una versión que se repite con frecuencia el impacto ocurre de refilón: Theia, que es bastante grande, golpea la Tierra, que es aún mayor, un poco fuera de centro. Desde el espacio los acontecimientos ocurren en cámara lenta. En el momento del contacto ambos mundos parecen, al principio, darse un tierno beso. Luego, durante los siguientes cuatro o cinco minutos, Theia parece aplanarse, como una bola de arcilla que cae al piso, sin demasiado efecto para la Tierra. Diez minutos después, Theia está casi aplastada y la Tierra comienza a deformarse. Media hora después de la colisión Theia se ha desintegrado por completo y la Tierra ya no es una esfera simétrica. Las rocas supercalientes se han vaporizado y emanan de la herida abierta en forma de arroyos luminosos contra las oscuras superficies de estos mundos trastornados.

Otro escenario que suele citarse es el que propuso, en 1970, el teórico Alastair Cameron, del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, y que se fue perfeccionando durante los siguientes veinte años. Según esta fascinante idea, Theia tenía más o menos 40 por ciento de la masa de la proto-Tierra. También ocurrió un impacto fuera de centro, pero en esta versión Theia rebotó contra la Tierra, salió disparada en forma de una bola alargada, y finalmente recibió su golpe de gracia, un segundo impacto tras el cual desapareció para siempre.

En ambos casos la catástrofe aniquiló a Theia, que se vaporizó en una inmensa nube incandescente que alcanzó decenas de miles de grados de temperatura y rodeó por completo la Tierra. Pero Theia alcanzó a hacer daños: un trozo bastante grande del manto de la Tierra también se vaporizó y salió expulsado, tras lo cual se mezcló con los restos dispersos de Theia. Parte del material escapó hacia el espacio, pero la mayor parte de los detritos del destrozo permanecieron en órbita gracias a la implacable sujeción gravitacional de la Tierra. A

partir de esta nube turbulenta los metales densos que se encontraban en los núcleos de ambos mundos se combinaron, se enfriaron, volvieron a su forma líquida y se hundieron para formar un nuevo núcleo terrestre, más grande esta vez. Los materiales del manto también se mezclaron y se vaporizaron para formar una nube de roca, infernalmente caliente, que rodeó todo el planeta. Durante algunos días o semanas violentos la Tierra experimentó una lluvia incesante de gotas de silicato al rojo vivo, que se mezclaron con un interminable océano de magma. Finalmente la Tierra se apropió de mucho de lo que había formado parte de Theia y terminó siendo un planeta más masivo.

Pero la Tierra no terminó apropiándose de todo el material que alguna vez formó parte de Theia. Un poco más lejos en el espacio se vio envuelta por una enorme acumulación de cascajo rocoso producto de la colisión, en su mayor parte una mezcla íntima de los dos mantos planetarios. Las gotitas de rocas, que comenzaban a enfriarse, se pegaron unas a otras, y los trozos más grandes devoraron a los más pequeños. En una especie de repetición instantánea de la acreción gravitacional que formó los planetas originales, la Luna se fusionó a gran velocidad y seguramente adquirió su tamaño actual en el transcurso de unos pocos años.

La física de la formación planetaria determina en qué posición puede haberse formado la Luna. Todos los objetos masivos están rodeados por una esfera invisible llamada el límite de Roche, dentro del cual las fuerzas gravitacionales son demasiado intensas para que se forme un satélite. Por eso Saturno tiene anillos inmensos pero no posee ningún satélite en un radio de unos 80 mil kilómetros de distancia de su superficie. La gravedad de Saturno evita que las partículas congeladas se fusionen para formar una luna.

El límite de Roche se calcula a partir del centro de un objeto en rotación. Para la Tierra es de unos 17 mil kilómetros, o aproximadamente 11 mil kilómetros desde la superficie. Así, los modelos de la formación de la Luna ubican el nuevo satélite a una distancia segura de unos 24 mil kilómetros, donde podría crecer en forma ordenada al tragarse la mayor parte de los fragmentos dispersos del Gran Impacto. Y así, hace tal vez unos 4500 millones de años, según la mayoría de los cálculos, fue como nació la Luna. La Tierra se consiguió un compañero, formado en buena parte por pedazos de ella misma.

Los científicos pronto aceptaron la teoría del Gran Impacto porque explica todas las evidencias mejor que cualquier otro modelo. A la Luna le falta un núcleo de hierro porque la mayor parte del hierro que poseía Theia terminó dentro de la Tierra. La Luna carece de compuestos volátiles porque los de Theia se escaparon durante el impacto. Siempre vemos la misma cara de la Luna porque el momento angular de la Tierra y Theia se combinaron en un solo sistema giratorio.

El Gran Impacto también ayuda a explicar la extraña inclinación del eje de la Tierra, de unos 23 grados, un elemento que ninguno de los escenarios previos podía acomodar muy bien. El impacto de Theia literalmente inclinó la Tierra hacia un lado. Cuando los científicos se dieron cuenta de que la Luna se formó a partir de un gran impacto comenzaron a especular sobre otras anomalías planetarias en el sistema solar. Tal vez los acontecimientos estilo Gran Impacto son comunes, y posiblemente necesarios. Eso puede explicar por qué Venus gira sobre su eje en sentido contrario y por qué perdió tanta agua, y posiblemente un enorme impacto provocó que Urano rote de lado.

La formación de la Luna fue un momento crucial en la historia de la Tierra, y tuvo consecuencias de muy largo alcance que son totalmente sorprendentes y que apenas ahora comenzamos a entender. Hace 4500 millones de años la Luna no era el romántico disco plateado que vemos hoy en el cielo. Por entonces era una influencia amenazadora, dominante e inimaginablemente destructiva sobre el ambiente de la superficie de la Tierra.

Todo se reduce a un hecho asombroso: la Luna se formó a sólo 24 mil kilómetros de distancia de la superficie de la Tierra, no mucho más lejos que un vuelo de avión de Washington, D. C., a Melbourne, Australia. Hoy, sin embargo, la Luna se encuentra a 382 mil kilómetros de distancia. De entrada, parece poco probable que una Luna gigante se aleje de ese modo de la Tierra, pero las mediciones no mienten. Los astronautas del *Apolo* dejaron espejos en la superficie de la Luna, y los científicos hacen reflejar en ellos rayos láser desde la Tierra para medir la distancia con una precisión de una fracción de centímetro. Cada año, desde principios de la década de 1970, la Luna se ha ido alejando 3.82 centímetros por año. No parece gran cosa, pero a la velocidad actual suma un kilómetro y medio cada 40 mil años. Si proyectamos la película en reversa podemos suponer que hace 4500 millones de años la situación era radicalmente distinta.

Para empezar, la Luna se *veía* totalmente diferente. A 24 mil kilómetros de distancia la Luna, con su diámetro de 3456 kilómetros, nos habría parecido gigantesca, diferente a todo lo que hayamos visto. Abarcaba casi ocho grados de arco en el cielo —más o menos dieciséis veces el diámetro aparente del

Sol— y tapaba doscientos cincuenta veces más luz del firmamento que la Luna actual.

Y ahí no acaba la cosa. La joven Luna era un cuerpo violento, con un vulcanismo intenso y muy diferente al objeto grisáceo y estático que vemos hoy. La superficie debe haber tenido un aspecto ennegrecido, surcado por grietas llenas de magma y cuencas volcánicas que eran visibles desde la Tierra. La Luna llena primigenia era igual de dramática, su superficie reflejaba cientos de veces más luz solar que en tiempos modernos. Podrías haber leído un libro bajo su luz, pero las observaciones astronómicas habrían resultado inútiles: su brillo habría opacado el de todas las estrellas o planetas.

Una cosa que contribuía al dramatismo de la situación era que todo sucedía a un ritmo acelerado. En el espacio no existe la fricción, así que los objetos que giran siguen haciéndolo durante miles de millones de años. La cantidad total de energía de giro del sistema Tierra-Luna —su momento angular— se mide mediante la combinación de dos movimientos circulares que nos resultan familiares. El primero es la rotación de la Tierra sobre su eje; conforme más rápido gira la Tierra, más momento angular tiene. El momento angular de la Luna, por el contrario, depende básicamente de qué tan lejos esté y de qué tan rápida sea su órbita alrededor de la Tierra. Su propia rotación no es una parte importante de la ecuación.

El momento angular total de la rotación de la Tierra más la órbita de la Luna no ha cambiado mucho durante los últimos miles de millones de años, pero la importancia relativa de ambos movimientos ha cambiado muchísimo. Actualmente, casi todo el momento angular del sistema Tierra-Luna se encuentra en la Luna, con sus 382 mil kilómetros de distancia y su periodo orbital de 29 días. La Tierra, que se encuentra en el centro de este sistema, y que es mucho más masiva y tiene un

cómodo día de 24 horas, sólo tiene una pequeña fracción del momento angular de la Luna. (Del mismo modo, los lejanos gigantes gaseosos cargan casi todo el momento angular del sistema solar, aunque el Sol mismo tenga 99.9 por ciento de la masa).

Pero hace 4500 millones de años las cosas eran muy distintas. Con la Luna a sólo 24 mil kilómetros de distancia todo daba vueltas ridículamente rápido, como el patinador en hielo que acerca los brazos al cuerpo para acelerar el ritmo de sus giros. Para empezar, la Tierra giraba sobre su eje cada cinco horas. Todavía le tomaba un año entero (unas 8766 horas) girar alrededor del Sol; ese tiempo no ha cambiado mucho en la historia del sistema solar. ¡Pero había más de 1750 días cortos por año, y el Sol salía cada cinco horas!

Este cálculo suena extravagante e imposible de comprobar, pero hay al menos un par de mediciones directas que confirman esta idea de que antiguamente los días eran más cortos. Los arrecifes de coral son una forma muy convincente de evidencia. Algunas especies de coral muestran líneas de crecimiento extraordinariamente precisas que registran tanto los sutiles ciclos diarios como los ciclos anuales, más evidentes. Como es de esperarse, los corales modernos muestran unas 365 líneas diarias por cada año de crecimiento. Pero existen corales fósiles del periodo Devónico, hace unos 400 millones de años, que muestran más de 400 líneas por año, lo que indica una tasa mayor de rotación. Los días sólo duraban 22 horas por ese entonces, y la Luna estaba unos 15 mil kilómetros más cerca de la Tierra.

La segunda medida, que complementa ésta, se basa en el eufónico fenómeno de las ritmitas mareales, que son sedimentos que se depositan en capas muy finas y revelan los ciclos diarios, lunares y anuales de las mareas. Algunos estudios mi-

croscópicos muy exhaustivos de ritmitas mareales de 900 millones de años de antigüedad que provienen del cañón Big Cottonwood, en Utah, sugieren un mundo en el que los días terrestres sólo duraban 18.9 horas, y donde había 464 días —464 salidas y puestas de Sol— cada año. Se calcula que la distancia entre la Tierra y la Luna en esa época era de 350 mil kilómetros, lo que implica que la tasa de recesión era muy similar a la de nuestros tiempos: 3.91 centímetros al año.

Mundo lunático

Todavía no existe ninguna evidencia directa que documente los ciclos de mareas de la Tierra anteriores a mil millones de años, pero podemos estar seguros de que hace 4500 millones de años las cosas eran más salvajes. La Tierra tenía días de cinco horas, pero además la Luna giraba muchísimo más rápido en su órbita cercana. Sólo le tomaba 84 horas —3.5 días modernos— darle la vuelta a la Tierra. La Tierra giraba tan rápido y la Luna orbitaba tan deprisa que nuestro conocido ciclo de Luna nueva, Luna creciente, Luna llena y Luna menguante se sucedía frenéticamente: cada pocos días de cinco horas aparecía una nueva fase lunar.

Estos hechos tuvieron muchas consecuencias, unas más benignas que otras. Con una obstrucción lunar tan grande en el cielo, y con movimientos orbitales tan rápidos, los eclipses eran acontecimientos muy frecuentes. Cada 84 horas sucedía un eclipse solar total en casi todas las lunas nuevas, cuando la Luna se ubicaba entre la Tierra y el Sol. Esto bloqueaba por completo la luz solar; las estrellas y los planetas aparecían de pronto contra un cielo oscuro y los feroces volcanes y los océanos de magma de la Luna destacaban, con un brillo rojizo,

contra el oscuro disco lunar. Los eclipses totales de Luna también ocurrían en forma regular, casi cada 52 horas después, con la regularidad de un reloj. Durante cada Luna llena, cuando la Tierra se encontraba justo entre el Sol y la Luna, la gran sombra de la Tierra oscurecía por completo la enorme cara brillante de la Luna. Una vez más, las estrellas y los planetas aparecían sobre un cielo negro y los volcanes de la Luna hacían, rubicundos, su aparición.

Una consecuencia mucho más violenta de la proximidad de la Luna eran unas mareas monstruosas. Si la Tierra y la Luna hubieran sido cuerpos sólidos perfectamente rígidos se verían hoy más o menos igual que hace 4500 millones de años: estarían a 24 mil kilómetros de distancia, y tendrían movimientos rotacionales y orbitales rápidos y eclipses frecuentes. Pero la Tierra y la Luna no son rígidas. Sus rocas pueden deformarse y doblarse; cuando están fundidas, en particular, se alzan y retroceden con las mareas. La Luna joven, a una distancia de 24 mil kilómetros, ejercía unas fuerzas de marea tremendas sobre las rocas terrestres, y la Tierra a su vez ejercía una fuerza gravitacional igual y opuesta sobre el paisaje lunar, en su mayor parte en estado líquido. Es difícil imaginar las enormes mareas de lava que ocurrían por entonces. Cada pocas horas la superficie de la Tierra, en buena medida conformada por rocas fundidas, debe haberse abultado más de un kilómetro en dirección a la Luna; esta deformación generaba una fricción interna tremenda que producía más calor y mantenía la superficie líquida durante más tiempo que en un planeta aislado. La gravedad de la Tierra le devolvía el favor: hacía sobresalir la cara de la Luna que da hacia la Tierra y deformaba nuestro satélite perfectamente esférico.

Estas colosales deformaciones de marea son la razón fundamental de que la Luna siga alejándose de la Tierra. ¿Cómo le

hace un objeto de 3450 kilómetros de diámetro para alejarse desde apenas 24 mil kilómetros a 382 000? La respuesta se encuentra en la conservación del momento angular, la suma constante de la energía rotacional de la Tierra más la energía orbital de la Luna. Las leyes de la física dicen que el sistema Tierra-Luna debe conservar, en gran medida, todo su momento angular original.

Hace 4500 millones de años una enorme deformación de marea recorría todo el planeta cada pocas horas. Pero como la superficie de la Tierra giraba alrededor de su eje más rápido (cada cinco horas) de lo que la Luna orbitaba alrededor del mismo eje (cada 48 horas), la deformación de marea, con su masa extra, siempre llevaba la delantera y constantemente jalaba la Luna con su fuerza de gravedad, haciéndola ir más y más rápido en cada órbita. Las leyes inmutables del movimiento planetario, que propuso hace unos cuatro siglos el matemático alemán Johannes Kepler, dicen que mientras más rápido orbita un satélite más lejos tiene que estar de su planeta central. Pero si la Luna orbita la Tierra más y más rápido, y por lo tanto se aleja de ella más y más, también tiene que ganar momento angular.

Al mismo tiempo que la deformación de marea de la Tierra jalaba a la Luna, la Luna deformada jalaba la enorme deformación de la Tierra con una fuerza gravitacional igual y opuesta, lo que hacía que la Tierra girara más despacio sobre su eje en cada rotación. Aquí es donde entra la conservación del momento angular. Mientras más rápido giraba la Luna, más lejos tenía que estar de la Tierra y más momento angular tenía que ganar. Para compensar, la Tierra tenía que rotar cada vez más lentamente sobre su eje para conservar el momento angular total del sistema Tierra-Luna. Piensa nuevamente en el patinador, que ahora extiende sus brazos para hacer más

lento el ritmo de sus giros. En el transcurso de 4500 millones de años la rotación de la Tierra ha pasado de ocurrir una vez cada cinco horas a una cada 24 horas, y la Luna se ha alejado y ha ganado un montón de momento angular en el proceso.

No todos los sistemas planeta-luna siguen este guion. Si el planeta gira sobre su eje más lentamente de lo que su luna lo orbita, sigue un proceso inevitable de frenado. Las deformaciones de marea en el planeta se quedan retrasadas y la luna se frena con cada órbita y se acerca cada vez más a su fin. Con el tiempo la luna se desplomará sobre el planeta y será devorada, en una variación más del Gran Impacto. Tal vez por eso Venus, con su rotación retrógrada, no tiene luna. Tal vez la desaparición cataclísmica de una vieja luna explica por qué Venus perdió su agua y es ahora un mundo inhóspito, ardiente y sin vida.

A comienzos de la historia del sistema Tierra-Luna estos intercambios de momento angular que llevaban a cabo la Tierra, cada vez más lenta, y la Luna, en constante aceleración, eran mucho más acentuados que hoy. En los primeros siglos tras la formación de la Luna ambos cuerpos estaban cubiertos por océanos turbulentos de magma que podían fluir y deformarse. Es probable que las gigantescas mareas de magma en la Tierra, y las deformaciones equivalentes en el magma lunar, causaran que la Luna se alejara decenas o cientos de metros al año aunque la frenética rotación de la Tierra se fuera haciendo cada vez más lenta. Pero estas enormes mareas terrestres no pueden haber durado mucho: conforme aumentaba la distancia Tierra-Luna las fuerzas de marea disminuían aún más: una duplicación de la distancia reduce la fuerza de gravedad a una

cuarta parte. Si se triplica la distancia, las fuerzas gravitacionales no tienen sino una novena parte de su potencia original.

El estrés continuo provocado por las mareas retrasó, pero no pudo detener, la solidificación de los mundos. A unos cuantos millones de años del Gran Impacto las superficies de la Luna y la Tierra estaban cubiertas de sólida roca negra. Las mareas de tierra —la deformación de la roca sólida— no eran nada insignificantes en esos primeros momentos, pero no se parecían mucho a las poderosas deformaciones diarias que sufría el magma que las antecedió.

La Luna es un recordatorio luminoso de que el cosmos es un lugar en el que la creación y la destrucción se entretejen. Ni siquiera hoy somos inmunes a algunas afrentas cósmicas catastróficas: de vez en cuando siguen cruzando la órbita de la Tierra asteroides y cometas asesinos. Hace millones de años una enorme roca mató a los dinosaurios; dentro de millones de años otras rocas igualmente grandes darán, inevitablemente, en el blanco. Si la supervivencia humana es nuestro principal imperativo como especie haríamos bien en seguir escrutando los cielos, pues nuestro vecindario cósmico más cercano es un mudo testigo de que el cambio suele ser benigno y gradual, pero a veces uno tiene días realmente muy malos.

EDAD DE LA TIERRA (miles de millones de años)

0	1	2	3	4	4-5,6,7
	Eón Hadeano	*Eón Arqueano*	*Eón Proterozoico*	*Eón Fanerozoico*	

↑

Capítulo 3
La Tierra negra

La primera corteza de basalto
Edad de la Tierra: de 50 a 100 millones de años

Durante su larga historia a la Tierra le ha tocado sufrir muchos eventos definitorios. El Gran Impacto fue sin duda el más perturbador y también el que, al dar origen a la Luna, tuvo los efectos más dramáticos. Pero un resultado como éste —una Luna grande y solitaria que orbita un planeta lleno de compuestos volátiles— no es para nada un resultado inevitable de las leyes de la física y la química. Si los detalles de la antigua interacción entre la Tierra y Theia hubieran sido un poquito diferentes, el episodio de formación de la Luna habría resultado muy distinto. Si el impacto hubiera ocurrido directamente en el centro de la Tierra, buena parte de la masa de Theia habría terminado formando parte de nuestro planeta. Posiblemente no tendríamos un satélite, pues Theia y la Tierra se habrían fusionado en uno de los mayores planetas sin luna. Por otro lado, si Theia no hubiera dado en el blanco su órbita podría haberse alterado lo suficiente como para salir lanzada hacia el centro, a Venus, o hacia el exterior, en dirección a Marte, para abandonar para siempre el vecindario terrestre. Y si el impacto hubiera sido más oblicuo aún, la distribución de

los restos podría haber producido muchas lunas que adornaran nuestro cielo nocturno, claro que más pequeñas.

La casualidad tiene un papel muy importante en nuestro dinámico vecindario cósmico. La historia del sistema solar es una letanía de golpes y de impactos que no sucedieron por un pelo. El asteroide que ayudó a acabar con los dinosaurios muy bien pudo haber fallado el tiro, lo que habría dejado que los *Tyrannosaurus* y su descendencia evolucionaran durante unas cuantas decenas de millones de años más. Tal vez unos pájaros con grandes cerebros se habrían convertido en constructores de herramientas inteligentes y alados. Los escuálidos mamíferos que vivieron en ésa era Mesozoica extendida posiblemente no habrían llegado muy lejos. Un par de cambios pequeños aquí o allá habrían sido suficientes para que la historia de la Tierra fuera muy distinta.

Pero algunos aspectos del cosmos son inevitables, deterministas. La producción de grandes cantidades de protones y electrones, y de las cantidades correspondientes de hidrógeno y helio, estaba determinada en nuestro universo desde el instante del *Big Bang*. La formación de estrellas era una consecuencia inevitable de la producción de grandes cantidades de hidrógeno y helio. La síntesis de todos los otros elementos mediante reacciones de fusión nuclear y supernovas estaba igualmente predeterminada por la formación de estrellas ricas en hidrógeno. Y la acreción de toda clase de planetas interesantes —parecidos a la Tierra, a Marte o a Júpiter, y docenas de tipos más que apenas ahora estamos comenzando a descubrir alrededor de estrellas lejanas— fue consecuencia inevitable de la síntesis de todos esos elementos químicos.

Así fue como la Tierra pos-Theia comenzó una época turbulenta de enfriamiento y autorganización. ¿Cómo era este nuevo mundo? Los geólogos le dieron a los primeros 500 mi-

llones de años el nombre de eón Hadeano, como reconocimiento de las condiciones infernales que deben haber prevalecido. La especulación informada de los científicos nos presenta un panorama extraordinario del eón Hadeano en la Tierra: exhalaciones volcánicas de azufre, ríos de lava incandescente y una lluvia constante de asteroides y cometas que bombardeaban la superficie. Sin embargo, nos resulta casi imposible conocer cualquier detalle de los primeros cientos de millones de años de vida de la Tierra, porque carecemos por completo de pruebas tangibles.

Para conocer los orígenes de la Tierra contamos con los ricos registros del sistema solar: el Sol y los miles de objetos que atrae su fuerza de gravedad. Hay decenas de miles de meteoritos que nos ofrecen vistazos íntimos de la edad de los planetésimos. Podemos encontrar los orígenes de la Luna en cada roca y muestra de suelo lunar. Pero no sobrevive nada de los primeros días de la Tierra, al menos nada en la Tierra misma, ni un fragmento de roca ni un grano de mineral.

Parece extraordinario, pero esa evidencia sí puede existir aún en forma de meteoritos, expulsados de la superficie de la Tierra durante los impactos gigantes que sucedieron hace miles de millones de años y que luego volvieron a caer en la Tierra o en la Luna. Estos especímenes deben andar por ahí y tal vez incluso ser abundantes, algunos prácticamente intactos desde entonces. De hecho, la búsqueda de estas viejas reliquias terrestres se cita con frecuencia como una de las razones científicas para regresar a la Luna. Una exploración minuciosa de la superficie lunar podría rendir frutos y hallar rocas hadeanas errantes que nos revelen datos sobre el pasado inaccesible de la Tierra.

Pero aunque sería muy lindo poder sostener en la mano un pedazo de la primera superficie sólida de la Tierra, hay otras

cosas que podemos hacer, pues aunque la Tierra ha cambiado una y otra vez, las leyes de la química y la física no. Hace 4500 millones de años esas leyes físicas y químicas prevalecían, como siempre, pero sin otros grandes impactos ni complicaciones de escala planetaria.

Inevitabilidad elemental

La evolución temprana de la Tierra fue consecuencia de dos realidades químicas entrelazadas: la cosmoquímica (la fabricación de elementos) y la geoquímica (la fabricación de rocas). Primero vino la cosmoquímica y la producción estelar de los elementos pesados: todo lo que hay en la tabla periódica más allá del hidrógeno y del helio, que son los elementos uno y dos de la primera fila. En nuestro universo muchos de esos elementos químicos estaban destinados a ser dominantes: el oxígeno, el silicio, el aluminio, el magnesio, el calcio y el hierro son muchísimo más abundantes que todos los otros elementos pesados, en particular en los planetas terrestres rocosos. Estos seis elementos conforman 98 por ciento de la masa de la Tierra, así como de la Luna, Mercurio, Venus y Marte.

Cada uno de estos elementos, los «seis grandes», tiene una historia química particular que contar. Cada uno contribuyó, a su manera, a que la Tierra se convirtiera en lo que estaba destinada a ser tras el Gran Impacto. La clave son los enlaces químicos. Recuerda que los átomos se unen unos a otros cuando sus difusas nubes de electrones interactúan y se combinan para formar arreglos más estables, en particular átomos con el número mágico de 2, 10 o 18 electrones. Para que este tipo de intercambio funcione algunos átomos tienen que desprenderse de sus electrones y otros tienen que acogerlos.

El oxígeno es el principal receptor de electrones en la Tierra. Cada átomo de oxígeno tiene en su núcleo ocho protones con carga positiva, que se equilibran eléctricamente con ocho electrones con carga negativa. Pero el oxígeno siempre anda buscando dos electrones más para formar el número mágico de diez electrones. Esa avidez constante hace que el oxígeno sea uno de los gases más reactivos y corrosivos en la naturaleza. Sin duda, un muy mal bicho.

Nosotros solemos pensar en el oxígeno principalmente como una parte esencial de la atmósfera (más o menos 21 por ciento está compuesto de oxígeno, y eso es lo que nos permite estar vivos). Pero ese afortunado acontecimiento atmosférico es un cambio relativamente reciente en la historia de la Tierra. Durante por lo menos dos mil millones de años la atmósfera de la Tierra estuvo completamente desprovista de oxígeno. Incluso en la actualidad casi todo el oxígeno de la Tierra —99.9999 por ciento— está fijado en las rocas y los minerales. Cuando escalas una montaña majestuosa y escarpada o caminas por un erosionado afloramiento rocoso, la mayor parte de los átomos que hay bajo tus pies son de oxígeno. Cuando te tiras en la arena de una playa, casi dos terceras partes de los átomos que sostienen tu cuerpo son de oxígeno.

Para que el oxígeno pueda desempeñar este crucial papel químico de aceptor de electrones también tiene que haber montones de otros átomos que pueden desprenderse de sus electrones o compartirlos. El donador más prolífico de electrones es el silicio, que representa casi uno de cada cuatro átomos en la corteza y el manto terrestres. El silicio tiene en su núcleo 14 protones con carga positiva, que oficialmente son equilibrados por 14 electrones con carga negativa. El silicio suele renunciar a cuatro electrones para alcanzar el número mágico de 10 electrones, con lo que se convierte en un ion de

silicio con una carga eléctrica positiva. En la corteza rocosa y el manto de la Tierra esos cuatro electrones errantes suelen ser devorados por dos átomos de oxígeno, que así se convierten en iones con carga negativa. Como consecuencia, en casi todas las rocas pueden encontrarse fuertes enlaces silicio-oxígeno, sobre todo en el cuarzo o SiO_2, una mezcla de un átomo de silicio y dos átomos de oxígeno. Los transparentes granos de cuarzo son muy resistentes y duran mucho tiempo. Se acumulan por trillones a lo largo de las costas, y son por mucho el mineral más común de la arena de playa. Seguramente has visto hermosos especímenes de cuarzo, transparente y con muchas facetas irregulares, que venden en las tiendas *New Age* como «cristales de poder». Cuando tomas uno de esos tesoros con la mano, dos terceras partes de lo que sostienes son oxígeno.

Los cristales con enlaces silicio-oxígeno, llamados en forma genérica silicatos, son los minerales más comunes de la Tierra, y se conocen más de 1300 especies (cada mes se descubre una nueva). La versatilidad de su conexión silicio-oxígeno les da una gran variedad de estructuras atómicas y de propiedades, como la resistencia al clima del cuarzo y el feldespato, la forma de racimo de las hermosas olivinos verdes y los granates rojos (las piedras semipreciosas zodiacales de los nacidos en agosto y enero, respectivamente), los hábitos de algunos tipos famosos de asbesto de formar cadenas de silicatos largos y delgados, o de construir láminas planas y delgadas de minerales como la mica, que alguna vez se usó como un sustituto barato del vidrio para ventanas.

Aunque el calcio, el magnesio y el aluminio son menos abundantes que el silicio, desempeñan un papel estructural en las rocas de silicato más comunes en la corteza y el manto terrestres. Igual que su abundante primo el silicio, cuando se en-

cuentran en forma de iones positivos ocasionalmente se enlazan con oxígeno suelto y forman óxido de calcio que reconocemos como cal; un compuesto más raro, el óxido de magnesio, y (cuando se incorporan al óxido de aluminio trazas de cromo o titanio, elementos más raros) los valiosos rubíes o zafiros.

El hierro, el sexto «gran elemento», es sin duda el más versátil de todos. Cada uno de los otros cinco —el oxígeno, el silicio, el aluminio, el magnesio y el calcio— adoptan una personalidad química dominante. El oxígeno casi siempre actúa como aceptor de dos electrones; el silicio casi siempre es donador de cuatro electrones, el aluminio es donador de tres electrones y el magnesio y el calcio son donadores de dos electrones cada uno. Pero el hierro, el elemento 26, desempeña tres papeles químicos muy distintos.

La estructura estratificada de la Tierra hace que destaque la versatilidad del hierro. Aproximadamente uno de cada diez átomos en la corteza y el manto terrestres —dominados por el oxígeno— es de hierro, mientras que el núcleo metálico de la Tierra está compuesto por hierro en 90 por ciento. Este llamativo contraste es consecuencia de que este elemento tenga 26 electrones, muy lejos del número mágico más cercano, 18, lo que lo convierte en un donante por excelencia. No hay forma de que el hierro done 8 electrones (ningún átomo puede aceptar tantos), así que tiene que arreglárselas con los aceptores que se encuentren presentes.

A veces el hierro actúa igual que el magnesio y dona hasta dos electrones para convertirse en un ion +2. En este estado divalente el hierro le otorga un característico color verdoso o azulado a muchos minerales y a otras sustancias químicas. El característico color verde de la gema peridoto (una olivino con hierro) y el color azul-verdoso de la sangre desprovista de oxí-

geno que corre por tus venas son ambos indicios de hierro divalente. En esta forma el hierro se enlaza con el oxígeno en una proporción de uno a uno. Y como los átomos de magnesio y de hierro son de tamaño similar, estos elementos con frecuencia se sustituyen libremente uno a otro en algunos minerales comunes en la corteza y el manto terrestres. Algunos de los minerales más abundantes de la Tierra, incluyendo la olivino, el granate, el piroxeno y la mica, tienen variantes que contienen básicamente cualquier proporción posible de magnesio y hierro, desde algunas versiones incoloras que tienen 100 por ciento de magnesio a variedades de tonos oscuros que contienen 100 por ciento de hierro divalente.

Sin embargo, el hierro no está limitado al estado +2. En presencia de muchos aceptores de electrones de inmediato dona un tercer electrón para convertirse en un ion de hierro +3. Esta forma trivalente del hierro le confiere a su portador un característico color rojo ladrillo. El óxido rojo, los ladrillos rojos y la sangre roja, rica en oxígeno, le deben al hierro trivalente sus brillantes tonalidades. Como el aluminio, que también adopta el estado +3, el hierro trivalente se enlaza en una proporción de dos a tres con el oxígeno para formar Fe_2O_3, un mineral común llamado hematita a causa de su color rojo sangre. Del mismo modo que el magnesio con frecuencia remplaza la forma divalente del hierro, el aluminio muchas veces remplaza la variante trivalente del hierro. Los minerales granate, anfíbol y mica pueden contener todas las proporciones de aluminio-hierro imaginables; las variedades ricas en hierro tienen un color rojo, en vez de verde.

Así que gracias al truquito, extremadamente útil, de ir y venir entre los estados +2 y +3 (volveremos sobre esta notable habilidad dentro de un par de miles de millones de años, cuando la vida aparece en escena por primera vez), el hierro,

en su estado divalente y trivalente, actúa como los otros miembros de los «seis grandes». Pero espera, porque el hierro tiene un papel más importante que desempeñar en la Tierra: puede formar metales con facilidad.

Todos los tipos de enlaces químicos de los que hemos hablado hasta ahora involucran un intercambio de electrones, y dan como resultado iones. El silicio, el aluminio, el magnesio, el calcio y el hierro donan electrones; el oxígeno se los lleva. Como consecuencia, estas uniones se llaman enlaces iónicos. Sin embargo, los metales adoptan una estrategia de enlace muy diferente. En un metal cada átomo dona uno o más electrones y adquiere una carga positiva. Pero esos electrones errantes se quedan por ahí, en el metal, en una especie de mar pegajoso y con carga negativa que mantiene juntos todos los átomos con carga positiva, como si fueran filas de balines que nadan en melaza. El hierro metálico es una enorme colección de átomos de hierro que comparten, entre todos, estos electrones errantes.

Este comportamiento comunitario tiene consecuencias muy profundas. Para empezar, todos los electrones compartidos pueden moverse libremente, así que los metales son excelentes conductores de la electricidad (que no es más que el flujo controlado de electrones). Por el contrario, en los materiales hechos de oxígeno y magnesio o silicio, enlazados iónicamente, cada electrón está tan firmemente fijo en su lugar que la electricidad no puede fluir. Otra consecuencia de los enlaces metálicos es que estos materiales tienden a doblarse, más que a romperse. El mar de electrones que rodea a los átomos puede doblarse y torcerse sin que pierda su fuerza colectiva, a diferencia del comportamiento de la mayor parte de las rocas y los minerales quebradizos.

Los lectores perspicaces habrán notado en este punto que el hierro no es el único que puede realizar este truco de formar metales. Las latas y el papel de aluminio y el cableado doméstico están por todos lados; las aleaciones de magnesio metálico son ubicuas en los autos de carreras de última tecnología y otros juguetes, y el silicio, que es semimetálico, yace en el corazón de todos los artefactos electrónicos (de aquí que se llame así Silicon Valley: *silicon* significa silicio en inglés). Pero el aluminio, el magnesio y el silicio metálicos son maravillas modernas de la industria química. Se necesitan grandes cantidades de energía para separar esos tercos elementos del oxígeno, y sus estados metálicos casi nunca se forman en la naturaleza.

El hierro está menos comprometido con el oxígeno y es más caprichoso con sus compañeros de enlaces químicos. A diferencia del silicio, el aluminio, el magnesio o el calcio, le parece perfectamente normal unirse a otros aceptores de electrones, en particular el azufre; el sulfuro de hierro es el mineral pirita, el brillante «oro de los tontos». También, a diferencia de esos otros elementos, el hierro forma con facilidad un metal denso que se hunde hasta el centro de los planetas y forma sus enormes núcleos.

La Tierra fundida

Los seis grandes elementos, cada uno de los cuales es una consecuencia inevitable de la evolución de las estrellas que explotan y de los planetas terrestres, también son los responsables de que existan las rocas más abundantes de la Tierra. Sus comportamientos químicos característicos condujeron a nuestro planeta a un camino irreversible de transformación que terminó dando como resultado el mundo que habitamos hoy.

Pero antes de que las rocas pudieran formarse, la Tierra tuvo que enfriarse.

Imagina de nuevo los años violentos que siguieron al impacto que dio origen a la Luna. Durante unos días o semanas lo que terminaría convirtiéndose en la Tierra y lo que se convertiría en la Luna aún estaba por decidirse. Ni la Tierra ni la Luna, en esos primeros días pos-Theia, tenían una superficie sólida. Los dos globos fusionados estaban unidos por un océano de magma que los rodeaba, turbio y al rojo vivo, bañado por una lluvia incandescente de silicatos fundidos a temperaturas de miles de grados Celsius.

Mientras la atmósfera se despejaba de los restos de Theia, la Tierra radiaba hacia el espacio una enorme cantidad de calor, y su capa superficial se enfriaba inexorablemente. A pesar de ello, algunos eventos cósmicos conspiraron para mantener fundida la superficie de la Tierra por un tiempo más. Para empezar, grandes asteroides hacían impacto en el planeta. Cada choque añadía más energía térmica, supercalentaba el área de impacto y frustraba sus intentos por formar una corteza estable. Las intensas mareas producidas por la gravedad de la Luna, que aún estaba muy cerca, también ayudaban a mantener la Tierra en estado líquido; cada cinco horas una gran protuberancia ecuatorial de magma turbulento recorría el planeta y quebraba cualquier capa delgada que hubiera podido formarse. También añadía calor al conjunto la gran reserva de elementos muy radiactivos de la Tierra, tanto los isótopos de aluminio y tungsteno, de vida corta y capaces de generar calor, como los isótopos de uranio, torio y potasio, con largas vidas medias. La naciente atmósfera, alimentada por los vapores volcánicos ricos en dióxido de carbono y en agua, puede haber amplificado estos efectos al inducir un estado de «superefecto invernadero».

Durante un lapso desconocido de tiempo, tal vez cien años, tal vez cien mil —un pestañeo en términos geológicos—, la Tierra permaneció en estado líquido. Pero estaba predestinada a enfriarse y a endurecerse. La segunda ley de la termodinámica exige que los objetos calientes que no tienen ninguna fuente importante de energía se enfríen, y que cuanto más caliente esté el objeto, más rápida sea la tasa de enfriamiento.

Existen tres mecanismos comunes que facilitan esta transferencia de calor. La primera es la conducción. Cuando un objeto más caliente toca uno más frío la energía térmica debe fluir de lo caliente a lo frío. Este proceso, dolorosamente obvio si alguna vez te has quemado los pies caminando por el pavimento caliente o te has ampollado las manos al tocar un quemador de la estufa, es provocado por el movimiento constante de los átomos. En los objetos más calientes los átomos experimentan movimientos más violentos. Cuando un objeto más frío, cuyos átomos se mueven más despacio, entra en contacto con un objeto más caliente, con átomos más frenéticos, parte de ese movimiento violento se transfiere mediante colisiones entre átomos. Si el objeto que tocas está lo suficientemente caliente puede afectar las moléculas de tu piel, matar células y ocasionar una quemadura. La conducción es una buena forma de transferir calor localmente, desde un objeto a otro que está junto a él, pero no sirve muy bien para transferir calor a escala planetaria. Toma demasiado tiempo transportar calor de un átomo al que sigue.

La convección, en la cual grupos de átomos calientes transportan energía térmica al por mayor, es una mejor elección planetaria para enfriarse. Cada vez que el agua hierve, experimentas la convección. Echa agua en una olla, prende la estufa y espera. Al principio el proceso es lento: la olla entra en contacto con el agua fría, le transfiere calor por conducción y, po-

co a poquito, los átomos de metal de la olla empujan las moléculas de agua. Pero pronto entra en acción otro mecanismo. El agua caliente del fondo comienza a expandirse y a elevarse a través del agua más fría y densa de arriba, con lo que transfiere grandes cantidades de calor a la superficie. Al mismo tiempo el agua de la superficie, más fría y densa, se hunde hacia el fondo caliente de la olla. El intercambio de calor ocurre más y más rápido: las columnas de agua suben y se hunden hasta que el agua hierve a borbotones. Mediante el ciclo convectivo del agua caliente que sube y el agua fría que baja, hay grandes volúmenes de agua que propagan el calor por todo el líquido en un baile rápido y efectivo.

A gran escala, la de la Tierra, la convección aparece por todos lados: en las refrescantes brisas marinas durante un día de verano, en las grandes corrientes oceánicas que viajan del Ecuador al Ártico, en los turbulentos frentes de tormentas salpicadas de relámpagos, en los manantiales en ebullición y en los chorros de los géiseres. Y lo mismo sucede en el interior de la Tierra: los magmas y las rocas más frías y densas cerca de la superficie se hunden, y los magmas más calientes y menos densos de las profundidades emergen a la superficie. Durante toda la historia de la Tierra la convección ha sido el motor principal del enfriamiento planetario.

Y luego tenemos la radiación, el tercer mecanismo para la transferencia de calor. Todos los objetos calientes irradian calor a sus alrededores, más fríos, en forma de radiación infrarroja que viaja 300 mil kilómetros por segundo en el vacío. Esta conocida forma de energía, tan evidente cuando te relajas y te bañas un rato en los rayos del Sol resplandeciente, se comporta en forma similar a las ondas de luz visible (aunque la radiación térmica tiene longitudes de onda un poco más largas). La fuente más obvia de energía infrarroja es sin duda el

Sol, que baña la Tierra en una radiación infrarroja que tarda unos 8.3 minutos en viajar hasta nosotros a través del vacío del espacio. Otros ejemplos familiares son los calentadores eléctricos, el fuego de la chimenea y los viejos radiadores de agua caliente. Todos los objetos calientes irradian calor a sus alrededores si éstos están más fríos. Tu cuerpo no es la excepción; es por eso que los auditorios atiborrados de gente se calientan tanto: cada persona irradia tanto calor como un foco de cien watts, un hecho fácil de verificar si uno se pone unos lentes de visión nocturna, que hacen que la gente y otros animales que emiten radiación infrarroja parezcan brillar en la oscuridad.

La tasa de transferencia de calor, ya sea por conducción, convección o radiación, depende del diferencial de temperatura entre los objetos más calientes y los más fríos. La conducción es más rápida, la convección más vigorosa y la radiación mucho más intensa si las diferencias de temperatura son mayores. La Tierra es un planeta tibio; a lo largo de su órbita alrededor del Sol irradia calor continuamente hacia el frío vacío del espacio. Pero la Tierra pos-Theia, aún al rojo vivo, lanzaba energía calorífica al espacio a un ritmo sin precedentes en épocas modernas. Literalmente brillaba en la oscuridad vacía del espacio.

Las primeras rocas

La Tierra irradiaba cantidades tan prodigiosas de calor hacia el espacio que era inevitable que se formara una corteza. En algún lugar, probablemente cerca de uno de los polos menos afectados por las fuerzas de marea, la superficie fundida se enfrió lo suficiente para que se formaran los primeros cristales. Pero enfriarse y cristalizarse no era para nada un evento senci-

llo. Muchas sustancias cotidianas tienen una temperatura bien definida, a la que su forma líquida se convierte en sólida al enfriarse, el famoso punto de congelación. El agua líquida se congela a cero grados, el plateado mercurio metálico a –38 grados y el etanol (el alcohol que bebemos) a -117 grados Celsius. Pero el magma es diferente: una característica peculiar es que no tiene un único punto de congelación (aunque en el caso del magma hablar de un punto de congelación de más de 1300 grados Celsius suena como un oxímoron).

Comencemos con las condiciones infernales que reinaron hace 4500 millones de años, inmediatamente después del choque con Theia, una época en la que la Tierra y su Luna compartían una resplandeciente atmósfera de vapor de silicio que se hallaba a temperaturas de 5 mil grados Celsius. Ese gas rocoso infernal se enfrió rápidamente, se condensó en forma de gotitas y cayó como una lluvia de magma sobre los nuevos mundos gemelos. Inevitablemente empezó a enfriarse: bajó a 3 mil grados, luego a 2 mil, luego a mil. Entonces comenzaron a formarse los primeros cristales.

Contar estas historias sobre las primeras rocas terrestres es la especialidad de los petrólogos experimentales, gente que inventa nuevas técnicas de laboratorio para cocinar y exprimir las rocas con el objetivo de imitar las condiciones que reinan en las profundidades de la Tierra. La búsqueda de los orígenes de las rocas enfrenta dos retos técnicos. Primero tienes que controlar temperaturas increíblemente altas, de miles de grados, mucho más altas que las que alcanza cualquier horno doméstico. Para hacerlo, los científicos fabrican bobinas de alambre de platino, meticulosamente espaciadas, por las cuales hacen pasar corrientes eléctricas muy intensas que les permiten alcanzar temperaturas extremas. Lo más desafiante es que estas temperaturas tienen que aplicarse al tiempo que las

muestras son sometidas a presiones brutales, decenas o cientos de miles de veces mayores que la atmosférica. Para esta exigente tarea los investigadores utilizan la ayuda de cilindros hidráulicos gigantes y de enormes prensas de tornillo.

Durante más de un siglo el Laboratorio de Geofísica del Instituto Carnegie, mi hogar científico, ha sido el centro de estas heroicas búsquedas de las verdades profundas de la Tierra. Durante un breve lapso, antes de que muriera prematuramente en un hospital, tuve la oportunidad de trabajar codo a codo con Hatten S. Yoder Jr., uno de los pioneros de la petrología experimental y principal experto mundial en los orígenes del basalto. Yoder era un hombre imponente, dinámico, entusiasta y muy atento, literalmente una encumbrada figura en su campo. Al haber servido como oficial naval durante la segunda guerra mundial estaba íntimamente familiarizado con los equipos metálicos gigantes. En la década de 1950 entró al Laboratorio de Geofísica y comenzó a usar cañones sobrantes y viejas corazas blindadas, todavía pintadas con el color gris de los barcos de guerra, para construir el laboratorio de alta presión que le daría forma no sólo a su carrera sino también a nuestra comprensión del suelo que pisamos.

La pieza central del artefacto de Yoder era una «bomba»: un enorme cilindro de acero de 30 centímetros de diámetro, 50 de largo y una perforación de 2.5 centímetros de ancho. Un extremo del artilugio se conectaba a una serie de bombas de gas, compresores e intensificadores que podían generar unas asombrosas 12 mil atmósferas de presión de gas —la presión que existe a 40 kilómetros de profundidad bajo la superficie de la Tierra— y, en caso de que el aparato alguna vez fallara catastróficamente, una energía acumulada equivalente al poder explosivo de una barra de dinamita. El otro extremo de la bomba alojaba un arreglo de muestras de roca de 30 centíme-

tros de largo y una enorme tuerca hexagonal de 15 centímetros de diámetro. Para sellar el aparato ajustábamos la tuerca con una llave que medía un metro de largo y pesaba diez kilos.

Lo lindo del aparato de Hat Yoder es que podíamos llenar tubitos de oro con rocas pulverizadas y muestras de minerales, meterlos en un calentador cilíndrico y asegurar todo el arreglo dentro de la cámara de presión de la bomba. Subíamos la presión, encendíamos el calentador eléctrico y la bomba hacía el resto del trabajo. Cada ciclo podíamos poner hasta seis tubitos de oro; cada corrida duraba desde unos cuantos minutos hasta algunos días. El genial invento de Hat Yoder estaba perfectamente adaptado para estudiar cómo evolucionaron las rocas de la corteza y el manto superior de la Tierra.

Lo que encontraron Hat Yoder y sus colegas fue que una mezcla incandescente rica en los seis grandes elementos comienza a solidificarse, por lo general, cuando se forman cristales de olivino, hechos de silicato de magnesio, al momento en que la mezcla se enfría por debajo de 1500 grados Celsius. Durante su periodo de enfriamiento tanto en la Luna como en la Tierra comenzaron a crecer en el magma hermosos cristalitos verdes, como semillas microscópicas que luego alcanzaron el tamaño de balines, guisantes, uvas… Pero la olivino suele ser más densa que el líquido en el que crece, así que esos primeros cristales comenzaron a hundirse, más y más rápido conforme los cristales crecían más y más, y en las profundidades se acumularon enormes masas de cristales casi puros que formaron una espectacular roca verde llamada dunita. Hoy es raro encontrar esta roca en la Tierra; sólo aparece en la superficie en ocasiones especiales, cuando los fenómenos que le dan forma a las montañas —como las deformaciones del terreno o la erosión— exponen los característicos cúmulos de olivino que se formaron en las profundidades.

El hundimiento constante de cristales de olivino alteró poco a poco los magmas que se enfriaban dentro de la Tierra y la Luna. Su composición cambió: fueron perdiendo magnesio y se concentraron cada vez más el calcio y el aluminio. En la Luna, conforme seguía enfriándose el océano de magma, comenzó a formarse un segundo mineral: la anortita, un feldespato hecho de aluminosilicato de calcio, comenzó a cristalizarse junto a la olivino y a formar pálidos bloques. A diferencia de la olivino, la anortita es menos densa que el líquido en el que se forma, así que tiende a flotar. En la Luna aparecieron enormes cantidades de anortita que flotaban en la superficie del océano de magma y que formaron una gran corteza de cadenas montañosas hechas de feldespato flotante que se elevaban hasta seis kilómetros sobre la superficie fundida. Estas masas blanco-grisáceas, que todavía ocupan 65 por ciento de la cara reflejante de la Luna, se llaman planicies lunares. Como se elevaron directamente a partir del océano de magma, son las formaciones más antiguas que se conocen en la Luna. Las muestras del *Apolo* revelan que estas anortositas tan características se encuentran en un rango de edades que van desde las más jóvenes, de 3900 millones de años, hasta las más viejas, de 4500 millones, que se formaron muy poco después del Gran Impacto.

En la Tierra, que tenía una composición más húmeda, océanos de magma más profundos y, por lo tanto, temperaturas y presiones internas más altas, ocurrió un escenario un poco diferente. Es posible que se hayan cristalizado pequeñas cantidades de anortita al poco tiempo de formada la Tierra, en entornos superficiales y con poca presión, pero era un mineral más bien secundario. Por el contrario, apareció en abundancia el piroxeno, rico en magnesio y el más común de los minerales de cadenas de silicatos, y se mezcló con la olivino

para formar un grueso amasijo de cristales. Así, en las primeras rocas de la Tierra predominan la olivino y el piroxeno, que aparecen en una dura roca verde-negruzca llamada peridotita. A lo ancho de los primeros 75 kilómetros del manto terrestre comenzaron a cristalizarse diferentes variedades de peridotita; el proceso probablemente comenzó hace más de 4500 millones de años y siguió durante muchos cientos de millones más.

A pesar de su abundancia original, la peridotita también es relativamente rara en la superficie de la Tierra actual. Un escenario bastante verosímil describe balsas de peridotita que se endurecieron y enfriaron para formar, temporalmente, la primera superficie rígida de la Tierra. Pero al enfriarse, la peridotita, igual que su predecesor, la dunita, se volvió mucho más densa que el ardiente océano de magma a partir del cual se formó. Al ocurrir esto, la superficie de peridotita se agrietó, se separó y se hundió de nuevo dentro del manto, y con ello desplazó más magma que se enfrió para formar más peridotita. A lo largo de cientos de millones de años el manto mismo se solidificó lentamente gracias a esta cinta transportadora de peridotita que funcionó en los 75 kilómetros de espesor del manto. La proporción de peridotita sólida se incrementó respecto a la de magma hasta que la parte superior del manto estaba compuesta en su mayor parte por roca sólida de olivino-piroxeno.

El corazón del asunto

En las profundidades del manto, entre 75 y 300 kilómetros bajo la corteza, el enfriamiento y la cristalización deben haber ocurrido en forma similar, aunque más lentamente. Todavía no conocemos bien los detalles del proceso —hace falta una

nueva generación de equipos de alta presión y alta temperatura que sean capaces de resolver algunos problemas complejos — pero la separación de los cristales del líquido mediante hundimiento y flotación probablemente desempeñó un papel importante, igual que en el entorno de la superficie.

Mucho de lo que sabemos sobre esos mundos profundos y ocultos se lo debemos a la ciencia de la sismología, el estudio de ondas de sonido que viajan por las profundidades de la Tierra. La Tierra repica continuamente como una campana: las olas que revientan en las costas, los camiones que rugen en los caminos y los temblores, grandes y pequeños, conspiran para sacudir la tierra y propagar ondas sísmicas. Igual que las ondas sonoras dentro de un cañón estrecho, las ondas sísmicas provocan ecos cuando chocan contra una superficie. Las ondas sísmicas revelan que el interior de la Tierra es un sitio complejo, formado por muchas capas.

En el nivel anatómico más básico la Tierra tiene tres capas: una corteza delgada y poco densa en la superficie, un manto espeso y denso en el medio y un núcleo metálico, muy grueso y denso en el centro. Cada uno de esos dominios tiene sus propias capas. El manto, por ejemplo, se divide en tres subcapas: manto superior, zona de transición y manto inferior. El manto superior, dominado por la peridotita, se extiende por unos 300 kilómetros; a esas profundidades la presión obliga a los átomos de la olivino a apretujarse en un cristal de silicato más denso, llamado wadsleíta, el material más abundante en la zona de transición del manto. El manto inferior, 250 kilómetros más abajo, exhibe un conjunto aún más denso de silicatos de magnesio. Las presiones en el manto inferior son tan altas —cientos de miles de veces la de la superficie— que los enlaces de silicio-oxígeno adoptan un arreglo de átomos todavía más denso y eficiente, llamado perovskita.

Los estudios sísmicos documentan la naturaleza y el alcance de cada una de estas capas del manto, mineralógicamente diferentes, y revelan que las transiciones entre ellas suelen ser limpias y ordenadas. Las superficies exactas de las transiciones cambian ligeramente, de veinte a treinta kilómetros según el lugar —bajo los continentes o bajo los océanos, por ejemplo —, pero cada límite parece ser relativamente homogéneo y claro. La sismología ofrece evidencia que sugiere que, por el contrario, la frontera entre el manto y el núcleo es una zona especialmente complicada, muy diferente de las claras transiciones entre manto y manto. En una primera aproximación, la frontera núcleo-manto produce el eco fuerte que es de esperarse, pues el contraste de densidades entre el manto de silicato y el núcleo metálico es tan extremo que crea una barrera física tan nítida como la que existe entre el aire y el agua y refleja la señal sísmica más fuerte de las profundidades de la Tierra. Hace más de un siglo esa división fue uno de los primeros rasgos ocultos en las profundidades de nuestro planeta que descubrieron los sismólogos.

Si la frontera fuera perfectamente lisa y regular produciría un reflejo sísmico concentrado, un eco que quedaría registrado en un sismómetro como un salto muy característico. Pero la señales sísmicas que refleja la frontera núcleo-manto suelen ser caóticas, extensas y fragmentadas. Allá abajo tienen que existir otras estructuras, como bultos irregulares o pilas de escombros. Los geofísicos, que no siempre se caracterizan por inventar términos muy llamativos, llaman a esta zona caótica y granulosa la capa D″ *(D doble prima)*. (Los astrofísicos, que acuñaron términos tan imaginativos como *enana café*, *gigante roja*, *energía oscura* y *agujero negro* llevan las de ganar en el juego de la nomenclatura científica).

La complejidad de esta profunda capa D″ se desprende en parte del dramático contraste de densidades entre el hierro metálico homogéneo del núcleo y la variedad de minerales ricos en oxígeno del manto. Todos los minerales del manto flotan en el núcleo denso como si fueran corchos sobre el agua, pero pueden tener densidades muy distintas. En el océano de magma primordial algunos silicatos se hundían y otros flotaban; en consecuencia, se hundieron grandes trozos de los primeros sólidos cristalizados, atravesaron el manto y fueron a flotar como balsas sobre el núcleo metálico. Algunos sismólogos se imaginan «montañas» de quinientos kilómetros de alto de pilas irregulares de minerales densos que descansan sobre la frontera núcleo-manto, y allí desvían en forma caótica las señales sísmicas.

Para nuestra sorpresa, en la frontera núcleo-manto también pueden existir grandes estanques y charcos de silicatos líquidos inusualmente densos, tal vez ricos en los elementos aluminio y calcio, así como un montón de «elementos incompatibles» que parecen faltar en los inventarios de las capas más exteriores de la Tierra. No podemos estar seguros, pero los sismólogos hablan de profundas «zonas de velocidad ultrabaja» en la capa D″, justo sobre la frontera núcleo-manto, en las que las ondas sísmicas viajan aproximadamente 10 por ciento más despacio que en las rocas adyacentes. Estos profundos lagos y estanques líquidos también podrían ser la solución al molesto problema de los elementos perdidos: sólo hay que echar todos los elementos incompatibles en la inaccesible capa D″, donde se quedarán recluidos para siempre en esa enigmática y heterogénea zona de basura mineralógica.

¿Y qué hay sobre el núcleo? Cuando la Tierra era muy joven ya se había formado un núcleo, denso y rico en hierro, de unos 3200 kilómetros de diámetro. Seguramente se encontra-

ba completamente fundido (a diferencia de lo que pasa hoy, cuando el núcleo interno parece ser una bola sólida de cristales de hierro de 1200 kilómetros de diámetro). Las temperaturas en esa clara línea divisoria entre el núcleo y el manto pueden haber excedido los 5 mil grados Celsius, y las presiones deben haber sido un millón de veces mayores que la de nuestra atmósfera moderna.

Desde el principio el núcleo caliente fue una zona dinámica y turbulenta, cruzada por corrientes de metal líquido. Una consecuencia importante de estas corrientes fue el nacimiento temprano del campo magnético de la Tierra, la magnetosfera, que funciona como un enorme electroimán. Los campos magnéticos desvían las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente, así que la magnetosfera terrestre sirve como una especie de escudo que bloquea el constante bombardeo de viento solar y rayos cósmicos; una barrera que tal vez es un requisito para los orígenes y la supervivencia de los seres vivos.

El núcleo también es una fuente importante de energía calorífica que ayuda a mantener la convección en el manto. Aún hoy, en zonas volcánicas como Hawai y Yellowstone emergen columnas de magma ardiente que provienen de la frontera núcleo-manto, a casi 3200 kilómetros de profundidad. Resulta llamativo que la ubicación precisa de estas columnas en la superficie puede estar determinada por la topografía de las profundidades. Las montañas de 480 kilómetros de altura que existen en la capa D″ pueden actuar como cobijas térmicas que cubren el núcleo, así que es posible que las zonas calientes se originen en los valles profundos y calientes que se encuentran entre estas extraordinarias montañas ocultas.

Basalto

En esencia, la historia de la evolución mineral consiste en una sucesión predeterminada de tipos de roca; cada etapa de formación mineral se sigue lógicamente de la etapa anterior. La primera corteza de peridotita de la Tierra, que nació del mar de magma primordial, fue una etapa infantil, crítica pero fugaz. Cuando finalmente se enfrió y se endureció resultó demasiado densa para permanecer en la superficie, de modo que se hundió en las profundidades de la tierra. Se necesitaba una roca diferente, menos densa, para cubrir la superficie de la Tierra. Esa roca era el basalto.

El basalto negro es la roca que predomina en la superficie de todos los planetas terrestres. El exterior de Mercurio, cruzado por múltiples cicatrices de asteroides, es casi puro basalto. También la chamuscada y montañosa superficie de Venus y la erosionada superficie de Marte. Los mares oscuros de la Luna, que contrastan tan vívidamente con las planicies de anortosita, de color gris pálido, son los restos endurecidos de enormes lagos basálticos negros. Y en la Tierra 70 por ciento de la superficie, incluyendo el suelo de todos los océanos, se encuentra sobre una costra de basalto subyacente.

El basalto viene en una variedad de sabores, pero está compuesto fundamentalmente por dos minerales de silicato. Uno de estos minerales clave es el feldespato plagioclasa, sin duda el mineral con aluminio más importante en los planetas y las lunas terrestres, y el mineral más común en la corteza. Dave Wones, mi profesor del MIT, una vez me sugirió que si me mostraban una roca misteriosa y me preguntaban qué era respondiera siempre «plagioclasa»; acertaría 90 por ciento de las veces. El segundo ingrediente mineralógico esencial del basalto es el piroxeno, la cadena de silicatos común que también se encuentra en la peridotita. El piroxeno es uno de un puñado

de minerales comunes que pueden incorporar los seis grandes elementos (y también muchos elementos menos comunes).

Para entender los orígenes de la plagioclasa y el piroxeno, los dos ingredientes minerales esenciales del basalto, debemos considerar los extraños hábitos que tienen las rocas al congelarse y fundirse. Hace 4500 millones de años, cuando empezó a enfriarse el océano de magma de la Tierra, primero se formó la olivino, luego un poquito de anortita y finalmente un montón de piroxeno. La roca de silicato de magnesio que resultó fue la peridotita, que dio forma a buena parte del manto superior. Conforme las masas de peridotita se formaban y se hundían, volvían a calentarse y a fundirse parcialmente.

Nuestras experiencias cotidianas con las cosas que se funden sugieren que el cambio de sólido a líquido ocurre siempre a una temperatura específica. El hielo de agua se funde a cero grados Celsius, la cera de vela doméstica lo hace por ahí de 54 grados, y el plomo metálico denso a 327. Pero las cosas no son tan sencillas con las rocas: la mayor parte no se funde por completo a una misma temperatura. Si calientas peridotita a mil grados Celsius se derretirá la primera parte (más abundante si la peridotita es rica en agua y dióxido de carbono, que son más volátiles). La composición de esas primeras gotitas microscópicas es dramáticamente diferente a la del conjunto de la roca de peridotita. La primera parte en fundirse tiene mucho más calcio y aluminio, un poquito más de hierro y silicio y mucho menos magnesio. El líquido inicial también es mucho menos denso que la roca de peridotita que lo alojaba. En consecuencia, si en el manto se funde incluso un cinco por ciento de la peridotita esto genera mucho magma que se acumula a lo largo de fronteras de grano mineral, se cuela en las fisuras y los recovecos y sube hacia la superficie, y eventualmente se convierte en basalto. A lo largo de los miles de mi-

llones de años de historia de la Tierra la fundición parcial de la peridotita ha generado cientos de millones de kilómetros cúbicos de magma de basalto.

El basalto fundido sube a la superficie de los planetas en dos formas complementarias. La más espectacular es a través de erupciones volcánicas como las de Hawai e Islandia, que producen feroces fuentes y ríos de magma. Estas dramáticas erupciones ocurren porque el agua y otros volátiles que se quedan atrapados dentro de los silicatos líquidos a altas presiones, a dos o más kilómetros de profundidad, se transforman violentamente en gas cuando se encuentran cerca de la superficie. Este vulcanismo explosivo puede arrojar ceniza y gases tóxicos hasta la estratosfera, lanzar «bombas» volcánicas tan grandes como un auto hasta un kilómetro a la redonda y aplanar todo el paisaje.

Estas erupciones de ceniza y lava basálticas pueden construir, capa por capa, montañas de muchos kilómetros de altura y cubrir de roca negra miles de kilómetros cuadrados. Este tipo de lava y ceniza basáltica es de grano extremadamente fino y rico en vidrio, pues el líquido se enfría tan rápido que los cristales no tienen tiempo de formarse. El resultado es una costra amorfa de lava solidificada. Algunos basaltos de olivino muy característicos sólo ocurren cuando la peridotita se funde parcialmente a profundidades relativamente bajas, de menos de treinta kilómetros, y contienen algunos brillantes cristales de olivino que se formaron bajo tierra durante la primera etapa de solidificación de la lava. Estos cristalitos verdes adornan las que de otro modo serían unas aburridas rocas negras.

Se necesita mucha fuerza explosiva para que el magma rompa la superficie, así que una cantidad significativa del magma basáltico nunca ve la luz del día. Estos líquidos al rojo vivo se quedan atrapados en las profundidades de la tierra,

donde se enfrían más lentamente, forman cristales de feldespato y piroxeno de unos tres centímetros de largo con aspecto de listones y se convierten en rocas llamadas diabasa o gabro. A veces el magma es inyectado en grietas casi verticales que aparecen en las rocas bajo la superficie para formar diques lisos. Si la roca huésped es suave y se erosiona, unos millones de años después el resultado puede ser una pared de diabasa larga y recta que se parece extraordinariamente a un sitio arqueológico derrumbado. Si, por el contrario, el magma es inyectado entre capas horizontales de rocas sedimentarias puede formar una gruesa repisa. Los acantilados de las Palisades, en el río Hudson, fáciles de ver río arriba de la ciudad de Nueva York, en la orilla occidental del río, son resultado de una serie de repisas basálticas que se inclinan ligeramente hacia el oeste para formar altiplanos paralelos (algunos de los terrenos más caros para construir) en el norte de Nueva Jersey y el sur de Nueva York. En otras ocasiones más el líquido se deposita y se enfría en cámaras de magma de forma irregular que pueden formarse a kilómetros bajo la superficie y que en ocasiones se extienden por largas distancias. Pero cualquiera que sea su geometría final, la diabasa y el gabro son exactamente como el basalto.

Tras la inevitable formación de la corteza basáltica la Tierra gozó por primera vez de una superficie sólida y resistente capaz de flotar. Antes de que existiera esta corteza, cuando el magma y la peridotita eran los únicos que definían la superficie del planeta, ningún rasgo topográfico podía elevarse demasiado por encima de la altura media del planeta. La peridotita al rojo vivo no es lo suficientemente fuerte para cargar una montaña. Pero el basalto, resistente y relativamente poco denso, es otra historia. La densidad promedio del basalto es más de 10 por ciento menor que la de la peridotita. Eso quiere decir que una masa flotante de basalto de diez kilómetros de es-

pesor se proyectará un kilómetro sobre el océano de magma. Los conos volcánicos se acumularían rápidamente y se elevarían aún más, tal vez tres kilómetros sobre el promedio. Así fue como la parchada superficie de la Tierra empezó a adquirir un carácter propio.

Un mundo hostil

Desde el espacio —a una distancia segura, por ejemplo la de la joven Luna— la fachada basáltica de la Tierra se veía de color negro profundo, surcada por grietas curvadas y puntos brillantes en los lugares en los que inmensos volcanes rompían la superficie con sus fuentes de lava. Los chorros de vapor grisáceo y cargado de cenizas oscurecían algunos de los conos volcánicos más ricos en volátiles y sus alrededores.

Imagina que viajas a 4400 millones de años en el pasado, justo a tiempo para ver la nueva superficie negra de esa Tierra hadeana. No podrías sobrevivir mucho tiempo en ese paisaje hostil y extraño. La superficie es bombardeada constantemente por meteoros que rompen la delgada corteza negra y salpican de roca despedazada y burbujas de magma las planicies desiertas. Se elevan incontables conos volcánicos que crecen constantemente hasta alcanzar miles de metros de altura y de los que manan enormes fuentes de magma, impulsadas por la fuerza explosiva del vapor y de otros volátiles que un buen día se enfriarán lo suficiente para formar los océanos y la atmósfera. No hay un solo rastro del oxígeno esencial para la vida. En esta Tierra implacable abundan compuestos sulfurosos y malolientes que atacan tu nariz, las fumarolas ardientes te escaldan la piel y los gases tóxicos te queman los ojos. En un mundo tan hostil tu agonía sería dolorosa pero breve.

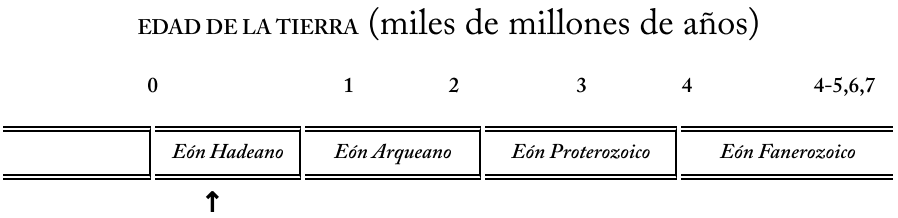
La Luna sigue alejándose, pero aún desempeña un papel crucial en la formación de la corteza. Si bien las mareas de roca y magma que viajan por la Tierra son menos extremas que durante los primeros siglos tras el impacto de Theia, siguen agrietando y rompiendo la superficie de la Tierra, y abren fisuras por las que mana magma al rojo vivo que impide la formación de una superficie sólida. La incómoda proximidad de la Luna también perpetúa la rotación delirantemente rápida de la Tierra: todavía existen días de cinco horas, acompañados por megatormentas y ultratornados más severos que cualquiera que se anuncie hoy en el Weather Channel.

Pero bajo esta torturada superficie ya había comenzado la inevitable evolución de la Tierra como un mundo vivo. El interior, líquido y dinámico, comenzó a separarse en zonas con distintas composiciones, materiales que un día se convertirían en los continentes y la corteza del fondo marino, las atmósferas y los océanos, las plantas y los animales. Procesos como el calentamiento, el enfriamiento y la cristalización, la separación de cristales por asentamiento y flotación, la acumulación de peridotita y el fundimiento parcial le dieron forma a la Tierra, desde su infancia hace 4500 millones de años hasta el día de hoy.

Las enormes reservas de calor interno de la Tierra, el tema central de este capítulo, siguen desempeñando un papel fundamental en la transformación de nuestro hogar planetario. Actualmente, las manifestaciones más evidentes de este oscuro reino ardiente son los volcanes, con sus feroces fuentes de magma y sus ríos de roca fundida. Las erupciones de los géiseres y los manantiales termales también son una muestra de lo infernales que son las cosas en ese reino subterráneo. A lo largo de los 4567 millones de historia de la Tierra el calor ha viajado, inevitablemente, desde el centro incandescente hacia

la fracturada corteza y de ahí al frío vacío del espacio, y la superficie es la que ha pagado el precio. Golpeada por los efectos de la agitada convección del manto, acentuados a su vez por la incesante atracción de la Luna, la corteza ha sido doblada y torcida, plegada y agrietada continuamente. Los continentes han viajado sin parar por el globo; se han desgarrado, chocado y rozado en la continua danza de las placas tectónicas, impulsada siempre por el calor. Durante cada día de nuestras vidas el calor interno de la Tierra transforma las rocas sobre las que vivimos, recicla el agua que bebemos y altera el aire que respiramos.

Gracias al calor, la Tierra estaba destinada a ser, durante un tiempo, un mundo negro, esmaltado con una delgada capa basáltica. Pero esa breve fase juvenil no podía durar mucho. Estaba a punto de rodear al mundo una nueva capa azul brillante que nació en el fondo de los volcanes.



Capítulo 4

La Tierra azul

La formación de los océanos

Edad de la Tierra: de 100 a 200 millones de años

La infancia de la Tierra, sus primeros quinientos millones de años, más o menos, están envueltos en el misterio. Las rocas y los minerales ofrecen evidencias tangibles de casi todo el agitado pasado de nuestro planeta, pero sobreviven pocas rocas o minerales del antiguo tiempo hadeano. Y por lo tanto, cualquier relato del enfriamiento de la Tierra y la formación de los mares sobre su negra superficie debe estar basado en especulaciones informadas por experimentos, modelos y cálculos. Y aun así siempre nos quedaremos con algunas dudas.

Eso no es malo. Lo que hace que cada nuevo día en el laboratorio resulte emocionante es todo lo que no sabemos y la posibilidad diaria de descubrir alguna pequeña pista que nos acerque a la verdad. Aún más tentadora es la posibilidad de descubrir aspectos del mundo natural «que no sabíamos que no sabemos», esos descubrimientos que no hacen más que profundizar los misterios[3]. Estas nuevas formas de hacer preguntas —«¿cómo evolucionan los minerales?», por ejemplo, en

vez de simplemente «¿cuáles son sus propiedades químicas y físicas?»— abren el camino a los descubrimientos.

Es importante realizar un inventario de las cosas que no sabemos. Todas las evidencias apuntan a que la Luna se formó tras un impacto de enormes dimensiones, pero no podemos decir con exactitud cuándo ocurrió la colisión, ni conocer los detalles de la trayectoria final de Theia. Podemos imaginar que tras ese colosal impacto cayó una lluvia torrencial de silicatos incandescentes sobre los torturados océanos de magma de la Tierra, pero la duración y la velocidad a la que se enfrió este mundo supercalentado son inciertos, y serán tema de debate durante muchas décadas por venir. Igualmente inciertas son la proximidad y la velocidad de alejamiento de la Luna, aunque son datos fundamentales para entender la dinámica y la evolución de la joven Tierra. Nadie sabe cuándo se formaron los primeros océanos, ni cómo eran. Pero se formaron, y la historia que sigue está basada en las evidencias que tenemos, y es la mejor que podemos contar por el momento.

La Tierra negra no seguiría siendo negra por mucho tiempo. El vulcanismo de escala global arrojó nitrógeno, dióxido de carbono, compuestos tóxicos de azufre y vapor de agua ardientes a la atmósfera, cada vez más espesa, a un ritmo de miles de millones de toneladas al día. Estos elementos y compuestos volátiles —exactamente las mismas moléculas que formaron los diferentes tipos de hielo de la antigua nebulosa, los mismísimos átomos que estás respirando y que constituyen cada uno de los complejos tejidos de tu cuerpo— desempeñaron diversos papeles en la Tierra, que evolucionaba a gran velocidad. Cuando el agua caliente se mezcló con los magmas de roca hizo descender sus puntos de fusión y los convirtió en una sopa supercalentada que se elevó a la superficie. Al acercarse a la superficie los gases disueltos en la sopa magmática,

que se encontraban en estado líquido, se expandieron violentamente para producir gigantescas explosiones volcánicas, parecidas a lo que ocurre cuando el contenido de un refresco muy agitado explota dentro de la lata. Algunos fluidos ricos en agua también se disolvieron y concentraron elementos raros —berilio, zirconio, plata, cloro, boro, uranio, litio, selenio, oro y muchos más— que eventualmente se convertirían en los grandes yacimientos minerales de la corteza terrestre, cada vez más diversificada. En el caos de la superficie los ríos furiosos y las olas violentas se convirtieron en los agentes principales de la erosión de la roca, de la formación de las primeras playas de arena de la Tierra y de la acumulación de sedimentos cerca de las orillas. En resumen, el agua se convirtió en el principal arquitecto de la superficie sólida de la Tierra.

Concentrarse en los océanos y en la atmósfera revela una perspectiva más bien antropocéntrica, pues estos fluidos son componentes insignificantes del planeta. Actualmente los océanos apenas representan 0.02 por ciento de la masa total de la Tierra, y la atmósfera no llega más que a una millonésima parte. Y sin embargo, los océanos y la atmósfera han ejercido una influencia desproporcionadamente grande en la formación de la Tierra tal como la conocemos, y siguen haciéndolo.

Entre los componentes gaseosos de la Tierra hay cuatro protagonistas principales: el nitrógeno, el carbono, el azufre y el agua. Todos estos ingredientes se producen en abundancia dentro de las estrellas más grandes, todos se dispersan durante las explosiones de supernovas y todos se concentraron en los meteoritos de condritas ricas en carbono más primitivos, de más de 4560 millones de años de edad.

La composición promedio de los meteoritos de condritas se parece en muchos sentidos a la de la Tierra actual. Los seis grandes elementos de los que hablamos en el capítulo 3 (oxí-

geno, silicio, aluminio, magnesio, calcio y hierro) se encuentran en proporciones notablemente parecidas, y lo mismo ocurre con muchos elementos menos comunes. Pero incluso un examen rápido de estos fascinantes objetos antiguos revela que buena parte del inventario original de compuestos volátiles de la Tierra está ausente hoy de nuestro planeta. Las condritas más primitivas tienen en promedio más de tres por ciento de carbono, pero todas las reservas de carbono conocidas en la Tierra suman apenas 0.1 por ciento. Lo mismo ocurre con el agua: el contenido de agua de las condritas es mucho mayor que el promedio de la Tierra, tal vez incluso cien veces más. Estas enormes disparidades en la composición de ambos objetos indican un pasado caótico y violento. La mayor parte de los compuestos volátiles de la Tierra deben haberse perdido en el espacio o se encuentran profundamente enterrados, donde no podemos obtener muestras.

La clave para entender la transformación de la Tierra, de una roca negra y maltrecha a un planeta azul, tibio y habitable, se encuentra en la historia de sus volátiles peripatéticos. Pero ningún compuesto sobrevivió intacto a los primeros quinientos millones de años de la Tierra. Casi todo el nitrógeno y el carbono, y todo el azufre y el agua, se han reciclado incontables miles de veces, y los mismos átomos han sido usados una y otra vez. Los meteoritos de condritas nos ofrecen un punto de partida cuantitativo para comenzar nuestras conjeturas; las pocas muestras de rocas y minerales con que contamos de los primeros millones de años de la Tierra, así como los datos de la Luna y de otros objetos del sistema solar, sirven para informar nuestras especulaciones. Y del mismo modo que para comprender la evolución del manto y la corteza durante los primeros cientos de millones de años de la Tierra, así como la formación de estrellas mucho antes que eso, la clave para

construir un escenario viable es conocer las características inmutables de los elementos en cuestión, en este caso las propiedades físicas y químicas de los volátiles nitrógeno, carbono, azufre y agua.

El nitrógeno es el más fácil de manejar de estos cuatro ingredientes. Es un gas químicamente inerte que forma pocos minerales, casi no desempeña ningún papel en la formación de las rocas y tiende a concentrarse en la atmósfera. De hecho, el ciclo del nitrógeno no tuvo mucho efecto en las capas superficiales de la Tierra sino hasta la aparición de la vida. El carbono y el azufre también se volverían mucho más importantes mil o dos mil millones de años después de la formación de la Tierra, cuando la vida y una atmósfera rica en oxígeno transformaron el reino de la superficie. Pero el cuarto ingrediente, el agua, ha sido fundamental en la historia de la Tierra desde el principio.

El agua: una breve semblanza

Los diversos papeles geológicos que desempeña el agua se deben a las singulares propiedades químicas del óxido de hidrógeno. Recuerda que el hidrógeno es el primer elemento y el oxígeno es el octavo; ninguno de ellos tiene el número mágico de 2 o 10 electrones. Cada átomo de oxígeno aceptor de electrones busca dos electrones más para alcanzar el número mágico 10, y cada átomo de hidrógeno con un electrón para compartir quiere uno más. El resultado molecular es una proporción de dos a uno de hidrógeno y oxígeno: H_2O. Los átomos que forman esta unidad compacta se acomodan en forma de V: el oxígeno, más grande, está en el centro, y a cada lado tiene dos protuberancias de hidrógeno, un poco como las ore-

jas de Mickey Mouse. El átomo de oxígeno, que ha tomado prestados electrones de los dos átomos de hidrógeno, adquiere una carga eléctrica ligeramente negativa, mientras que cada átomo de hidrógeno es proporcionalmente positivo. El resultado es una molécula polar, con partes opuestas que tienen cargas eléctricas positivas y negativas (las orejas y el hocico de Mickey, respectivamente).

Esta polaridad de las moléculas de agua es la responsable de muchas de sus propiedades características. El agua polar es un supersolvente, porque sus extremos positivo y negativo ejercen fuerzas poderosas que pueden desarmar otras moléculas. Es por ello que la sal de mesa, el azúcar y muchos otros ingredientes se disuelven rápidamente en agua. A la mayor parte de las rocas les toma un poco más disolverse, pero a lo largo de millones de años los océanos se han vuelto ricos en casi todos los elementos químicos. (En consecuencia, cada kilómetro cúbico de agua de mar contiene unos ciento quince kilogramos de oro, que valdrían más de diez millones de dólares al considerable precio reciente del oro… si tuviéramos la tecnología para extraerlo). Esta habilidad única del agua para disolver y transportar otras sustancias también la convierte en un medio ideal para el origen y la evolución de la vida. Toda la vida en la Tierra, y tal vez toda la vida del cosmos, depende del agua.

La polaridad de las moléculas de agua ocasiona que se enlacen fuertemente unas con otras: la parte positiva de una molécula atrae las partes negativas de otras. Es por eso que el hielo es un sólido molecular inusualmente fuerte (cosa que nunca olvidarás si te has puesto una buena caída al patinar sobre hielo). Estos enlaces intramoleculares inusualmente fuertes también le dan al agua una tensión superficial particularmente alta, una propiedad fascinante que le permite a los insectos pequeños caminar, literalmente, sobre el agua. La tensión super-

ficial también da lugar a la acción capilar, que provoca que el agua suba por los tallos de las plantas vasculares y permite que los árboles alcancen cientos de metros de altura. Las gotas de agua, redondeadas por la fuerte atracción mutua de las moléculas de agua, es otra manifestación de la tensión superficial, y un eslabón vital para mantener el inusualmente rápido ciclo del agua en la Tierra. Las moléculas volátiles no polares, como el metano y el dióxido de carbono, no pueden formar estas gotitas: sólo pueden flotar en la atmósfera en forma de una penetrante neblina ultrafina, así que la «lluvia» sería un fenómeno desconocido en un planeta dominado por estos gases atmosféricos.

Los enlaces fuertes entre las moléculas son la causa de otra de las propiedades más curiosas e importantes del agua: el agua líquida es aproximadamente 10 por ciento más densa que el hielo sólido. En casi todos los compuestos químicos que se conocen el sólido se hunde en su líquido, una situación que resulta intuitivamente lógica, pues en los sólidos las moléculas están dispuestas en patrones regulares y repetidos, en contraste con los líquidos, en los que están distribuidas en forma arbitraria. Piensa que es como guardar cajas de zapatos en la bodega de una zapatería. Las pilas ordenadas de cajas (como moléculas perfectamente alineadas en una estructura cristalina sólida) ocupan mucho menos espacio que una pila desordenada (como las moléculas que chocan caóticamente en un líquido). Pero en el agua las moléculas se ordenan de forma más eficiente en su estado líquido arbitrario que en los ordenados cristales de hielo.

La consecuencia relevante es que el hielo, ya sea en un cubito dentro de tu bebida, en forma de capa sobre un río o un arroyo congelado, o en un iceberg, flota. Si no fuera por esta insólita característica muchos cuerpos de agua se congelarían

en bloque en vez de formar una gruesa capa protectora de hielo durante el invierno. En un mundo en el que el hielo se congelara por completo la vida acuática enfrentaría riesgos muy serios y el vital ciclo del agua se detendría casi por completo. Curiosamente, el mismo fenómeno es uno de varios factores que permiten esquiar y patinar sobre hielo. La presión que ejerce la cuchilla de tus patines al presionar el hielo sólido ayuda a producir una delgada capa de agua líquida, más densa, sobre la que puedes deslizarte. Si la temperatura desciende mucho, en general por debajo de −73 grados Celsius, no se forma esta capa de agua lubricante y patinar y esquiar se vuelve mucho más difícil.

Y sin embargo, otra característica distintiva del agua «pura» es su falta de pureza. No importa qué tan cuidadosamente se filtre o se destile, el agua *nunca* está compuesta por completo de moléculas de H_2O. Es inevitable que una pequeña parte de esas unidades compuestas por tres átomos se desprendan para formar iones de hidrógeno positivamente cargados (hidrones o iones H+, que de hecho no son sino protones individuales con carga positiva y sin ningún electrón) y grupos hidroxilo negativamente cargados (iones OH-). Los hidrones se aferran rápidamente a las moléculas de agua para producir iones de hidronio H_3O+. Lo que llamamos agua pura a temperatura ambiente contiene cantidades iguales de hidronio positivo y grupos hidroxilo negativos, en una concentración que equivale a un pH de 7 (un «potencial hidrógeno» de 10^{-7} moles de grupos hidronio por litro, en términos químicos).

Uno de los temas sobre los que se especula respecto a los primeros océanos terrestres es su pH y su contenido de sal. El agua disuelve fácilmente muchas impurezas, algunas de las cuales están positivamente cargadas, como los iones de sodio (Na^+) o de calcio (Ca^{2+}), y otras negativamente cargadas, como

los iones de cloro (Cl-) o carbonato (CO_3^{2-}). Como regla general, la carga eléctrica total de cualquier solución de agua en grandes volúmenes debe ser cero: el número total de cargas positivas debe estar equilibrado por un número igual de cargas negativas. En el agua pura a temperatura ambiente, 10^{-7} moles de H_3O+ están perfectamente equilibrados por 10^{-7} moles de OH–. En los ácidos, sin embargo, el exceso de H_3O+ debe equilibrar iones negativos (como el cloro en el ácido clorhídrico, HCl). En las bases, el exceso de OH– debe equilibrar iones positivos (como el sodio en la base hidróxido de sodio, NaOH).

La fuerza de los ácidos y las bases se mide en la escala pH. Los valores bajos de pH indican soluciones ácidas, con más iones H_3O+ que OH–. Una solución ligeramente ácida con un pH 6 (típico del agua de la llave sin tratar en muchos lugares) tiene diez veces más iones de hidronio que una solución neutral con pH 7. Algunos líquidos más ácidos incluyen el café (pH 5, con cien veces más H_3O+), el vinagre (pH 3, con diez mil veces más H_3O+) y el jugo de limón (pH 2, con cien mil veces más H_3O+). Las bases, por el contrario, son líquidos con más OH– que H_3O+, y por lo tanto con valores de pH más altos que 7. Algunas bases comunes incluyen el bicarbonato de sodio (pH 8.5), la leche de magnesia (un antiácido popular con pH 10) y los limpiadores caseros con amoniaco (pH 12). Como veremos más adelante, el pH y la salinidad de los primeros océanos terrestres siguen siendo un tema que se discute apasionadamente.

Agua, agua por todos lados

El agua es una de las sustancias químicas más abundantes del cosmos. Mientras más buscamos más la encontramos, y su presencia en otros planetas, lunas y cometas nos ofrece pistas sobre su abundancia aquí en la Tierra, así como sobre la posible distribución en el universo de formas de vida basadas en el agua. Las observaciones por medio de telescopios pueden resultar engañosas, pues nuestra atmósfera rica en agua tiende a ocultar todos los depósitos de H_2O en las fuentes lejanas, con excepción de las más concentradas. A pesar de esto, sabemos que algunos objetos en el espacio profundo tienen una superficie helada, gracias a la forma característica en que absorben la radiación infrarroja.

Estas huellas espectroscópicas revelan que algunos cometas y asteroides contienen cantidades significativas de agua congelada. Los astrónomos han documentado muchos mundos helados en nuestro sistema solar, desde Plutón y su luna compañera, Caronte, hasta los luminosos anillos congelados de Saturno. Si bien todos los planetas gaseosos gigantes están compuestos principalmente por hidrógeno y helio, sus densas atmósferas contienen cantidades importantes de vapor de agua. Y se cree que Europa y Calisto, las grandes lunas de Júpiter, están cubiertas por una capa de hielo de algunos kilómetros de espesor que flotan sobre profundos océanos de agua.

A primera vista los otros planetas terrestres, más cerca de casa, parecen ser bastante secos. Mercurio está tan cerca del Sol que cualquier agua que haya existido cerca de la superficie se evaporó hace mucho, así que este planeta, el más caliente de todos, también es el más deshidratado. Venus, el planeta que sigue, puede haber tenido en sus inicios una dotación de agua parecida a la de la Tierra, pero hoy parece carecer casi totalmente de H_2O cerca de la superficie. Su gruesa y sobrecalentada atmósfera de dióxido de carbono nos habla de un efecto

invernadero desbocado y de una antigua pérdida de la poca agua superficial que pueda haber tenido cuando se formó.

Marte, con sus casquetes polares de hielo que se expanden y se encogen al ritmo del ciclo marciano de las estaciones, de 687 días de duración, es otra historia. Durante mucho tiempo los astrónomos han especulado que el planeta rojo puede ser un mundo húmedo y vivo. En la década de 1870, cuando la órbita de Marte se encontró particularmente cerca de la Tierra, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli documentó líneas negras oscuras que interpretó como *canales* naturales por los que posiblemente fluía el agua, es decir *canali*, en italiano. Luego la traducción al inglés de esta descripción original las llamó por error *canals*, que en ese idioma implican la idea de estructuras de alta tecnología, y cobró vida la idea de una extinta raza marciana inteligente. El más notable de estos entusiastas de Marte fue Percival Lowell, el astrónomo de Harvard que en 1890 se obsesionó con los descubrimientos de Schiaparelli. Lowell usó el dinero de su familia para construir un observatorio privado en Flagstaff, Arizona, donde se entregó al estudio de Marte. Armado de un telescopio último modelo de 24 pulgadas pensó que podría ver, bajo los claros cielos de Arizona, una gran red de canales que se extenderían desde los polos, presumiblemente cubiertos de hielo, hasta el seco Ecuador. En sus exitosos libros *Mars* (*Marte*, 1895), *Mars and its canals* (*Marte y sus canales*, 1905) y *Mars as the abode of life* (*Marte como el hogar de la vida*, 1908) Lowell describe la última obra maestra tecnológica de una raza extinta a causa de la falta de agua.

Las vistosas imágenes de Lowell alimentaron una ola de cuentos y novelas de ciencia ficción (entre ellas el clásico de H. G. Wells *La guerra de los mundos*, de 1898), pero no sirvieron para convencer a la comunidad científica de que en Marte

hay agua, y mucho menos vida. Tras más de un siglo de estudiar Marte con telescopios más y más grandes, y de un frenesí de sofisticadas misiones de reconocimiento (la primera de las cuales fue el *Mariner 9*, en 1971) y de aterrizajes (comenzando con el *Viking* en 1976), no se habían obtenido pruebas definitivas de que en Marte existieran cuerpos de agua o de cuál era su extensión. A finales de la década de 1970 las misiones *Viking* finalmente documentaron en forma inequívoca la presencia de hielo de agua en la región polar del norte de Marte mediante mediciones espectrales, pero sólo a partir del año 2000, y con ayuda de un arsenal de instrumentos a bordo de la última generación de satélites, así como de instrumentos de excavación en la sonda *Phoenix* y los rovers *Spirit* y *Opportunity*, se ha revelado la verdadera cantidad de agua en Marte y la naturaleza de sus depósitos.

Actualmente la mayor parte del agua de Marte se encuentra en forma de permafrost bajo la superficie, y posiblemente como agua corriente en zonas más profundas y tibias, tal vez incluso en enormes depósitos que permanecen ocultos por la seca capa exterior. En 2002 la nave *Mars Odyssey*, que llevaba consigo un sofisticado espectrómetro de neutrones, encontró algunas pistas sobre la extensión de esta agua bajo la superficie. Cuando los rayos cósmicos bombardean la superficie de Marte pueden desprender neutrones de depósitos ricos en hidrógeno (es decir, que contienen agua). El espectrómetro estaba diseñado para detectar estos neutrones que emanan de una amplia franja de superficie marciana, desde el Ecuador hasta latitudes más altas. Sin embargo, estos fascinantes resultados provocaron tantas preguntas como respuestas, porque no se pudo determinar si el agua se encontraba en forma líquida, sólida o asociada con minerales.

En 2007 el *Mars Reconnaissance Orbiter* de la NASA, con ayuda de un radar capaz de penetrar el suelo, nos proporcionó una imagen de mucha mayor resolución de esta agua escondida. Dichas mediciones pioneras detectaron acumulaciones de hielo tan grandes como glaciares en las latitudes del centro y sur del planeta. Más recientemente el *Mars Express Orbiter* de la Agencia Espacial Europea usó un sistema de radar parecido para detectar hielo oculto a gran profundidad a lo largo de una ancha franja del planeta. Algunas áreas cercanas al polo sur revelaron tener zonas ricas en hielo de más de ciento cincuenta kilómetros de profundidad. De hecho, es posible que Marte contenga bajo la superficie una cantidad de hielo equivalente a un océano que cubra el planeta entero y de cientos de metros de profundidad. Así que los océanos terrestres pudieron haber tenido alguna vez un primo marciano.

El agua también puede detectarse a partir de la presencia de rocas y minerales característicos. El lander *Phoenix* y los intrépidos rovers *Spirit* y *Opportunity*, los tres de la NASA, encontraron muchas pruebas complementarias de minerales que se formaron mediante interacciones entre el agua y las rocas. Resulta que las arcillas, minerales ricos en agua, son un fenómeno corriente en el ambiente superficial marciano, y es posible que representen buena parte del material rico en hidrógeno que los detectores de neutrones observaron unos años antes. También son comunes las evaporitas, minerales característicos de los lagos secos, así como el ópalo, una variedad del cuarzo mal cristalizado que suele formarse en los sedimentos húmedos del fondo de los océanos.

Cada vez que los científicos planetarios estudian el planeta rojo con nuevos ojos encuentran más evidencias de que por la sinuosa superficie marciana un día fluyó agua líquida. Las fotografías de alta resolución revelan antiguos valles y barrancas

fluviales salpicadas de peñascos, islas con forma de gota, depresiones y pequeños canales entrecruzados. Estos accidentes geográficos corren a través de sedimentos que parecen haber sido depositados en lagos o mares pocos profundos. Y de hecho, las terrazas que rodean el hemisferio norte de Marte, parecidas a las de las playas terrestres, implican que los océanos boreales pudieron haber cubierto en algún momento más de una tercera parte de la superficie marciana. Ese Marte, más fresco que el actual, podría haber sido entonces, muchos millones de años antes que la Tierra, un planeta azul favorable para la vida.

Y luego tenemos a la Luna, un elemento clave para entender la historia del agua en la Tierra, su compañera. La creencia popular es que la Luna está seca como un hueso (de hecho más seca que un hueso, que conserva una cantidad significativa de agua incluso cuando está expuesto al sol del desierto). Hay muchas líneas de investigación que apuntan a que de hecho es así de árida: los telescopios terrestres no muestran la absorción infrarroja característica del agua, las rocas lunares recolectadas en los seis alunizajes del *Apolo* no contenían rastros detectables de este compuesto (al menos según los estándares analíticos de 1970) y el hallazgo de hierro metálico sin oxidarse tras cuatro mil millones de años en la superficie lunar parece descartar incluso una cantidad ínfima de agua corrosiva.

Lo curioso de la creencia popular es que eventualmente alguien la pone en duda y de vez en cuando encuentra cosas realmente interesantes. En 1994 un único sobrevuelo de la misión *Clementine* obtuvo mediciones de radar que resultaban consistentes con hielo de agua, aunque a muchos científicos no les pareció muy convincente. Cuatro años después el *Lunar Prospector* empleó espectroscopía de neutrones para detectar

una concentración importante de átomos de hidrógeno, y por lo tanto posible hielo de agua o minerales que contienen agua, cerca de los polos lunares. Aún entonces muchos expertos señalaron que una fuente más probable para la señal eran iones de hidrógeno arrastrados hasta allí por el viento solar. Pero en octubre de 2009 la NASA hizo chocar la etapa superior del cohete *Atlas* en uno de estos cráteres (el cráter Cabeus, cerca del polo sur de la Luna) y analizó la columna de desechos que levantó el impacto en busca de señales de H_2O. Y allí estaban: la lluvia de polvo incluía una cantidad pequeña pero significativa del compuesto vital, suficiente para renovar el interés en el agua lunar y sus posibles orígenes. Ese mismo mes aparecieron en *Science* tres artículos seguidos que establecían que las evidencias de agua en la Luna hoy son incontrovertibles.

Aquí es donde entran Erik Hauri y sus colegas del Instituto Carnegie. Con ayuda de una microsonda iónica —un instrumento muy sensible que no existía cuando la primera generación de científicos estudió las muestras del *Apolo*— el equipo de Hauri volvió a examinar cuentas de vidrio de colores como las que estudié durante mi primer trabajo de geología, allá por 1976, cuando me dedicaba a encontrar partículas lunares. Otros científicos habían buscado rastros de agua en esas cuentas en décadas pasadas, pero sus habilidades de detección no podían competir con las de la microsonda de iones, capaz de tomar mediciones en escalas de una millonésima de pulgada. Hauri y sus colegas pulieron varias cuentas de vidrio para que los cortes transversales redondeados pudieran verse en la sonda de iones. Los bordes exteriores de las cuentas resultaron ser muy secos, con apenas unas cuantas partes de agua por millón, pero los núcleos de las cuentas más grandes tienen hasta cien partes por millón. A lo largo de miles de millones de años casi toda el agua de las cuentas se ha evaporado, más la de las ori-

llas que la del núcleo. Sin embargo, con base en la importante cantidad de agua que queda dentro de las cuentas, Hauri y sus colegas calcularon que el contenido original de agua en el magma lunar puede haber sido hasta de 750 partes por millón, bastante agua en comparación con muchas rocas volcánicas de la Tierra, y más que suficiente para provocar en la superficie un vulcanismo que habría dispersado el magma mediante erupciones explosivas hace miles de millones de años.

Si hubo suficiente agua para alimentar los volcanes del pasado lunar aún debe existir mucha más, encerrada en algún punto del helado interior de la Luna. Y como la Luna se formó principalmente a partir del impacto de Theia, que excavó profundamente en el manto original de la Tierra, es muy probable que también el interior de nuestro planeta contenga cantidades prodigiosas de agua invisible.

El ciclo del agua visible

Por más agua que terminemos encontrando en Marte o en la Luna (y parece que hay mucha) la Tierra sigue siendo el único mundo acuático del sistema solar. La historia del agua terrestre —cuánta hay, qué formas adopta, dónde se encuentra y cómo se mueve— es bastante complicada. Hasta hace poco, por ahí de la década de 1990, se pensaba que los océanos eran los mayores depósitos de agua y que contenían cerca de 96 por ciento del inventario accesible del agua de la Tierra. Los casquetes polares y los glaciares, que contienen hoy tres por ciento del agua del planeta (y tal vez no más de cinco o seis por ciento incluso en las épocas de mayor avance del hielo, durante las glaciaciones), quedan en un lejano segundo lugar. El agua subterránea (toda el H2O que se encuentra bajo la su-

perficie, tanto en acuíferos bien definidos como en rocas dispersas) representa uno por ciento, mientras que todos los lagos, ríos, arroyos, estanques y la atmósfera juntos no integran más que una diezmilésima parte de los suministros de agua cerca de la superficie de la Tierra.

Toda esta agua está en permanente movimiento y cambia de un lugar a otro en una escala que va de días a millones de años. El ciclo del agua, tan dinámico como indispensable para la vida, representa la fuente más evidente de cambio en nuestro siempre cambiante planeta. Imagínate todos los posibles paseos de una sola molécula de agua, hecha por cierto de un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno que han existido por miles de millones de años. Comencemos con una molécula dentro del poderoso océano Pacífico, donde la mayor parte de las moléculas de la superficie de la Tierra pasan casi todo su tiempo. Un enorme río oceánico de agua fría, la corriente de California, barre con la molécula y la lleva desde las inmediaciones de Alaska hacia la costa de California; de ahí llega a Baja California y después al Ecuador. Allí el agua se calienta y asciende, la molécula alcanza la superficie del océano y comienza un viaje épico, en sentido contrario a las manecillas del reloj, alrededor del Pacífico norte. Primero toma la corriente ecuatorial del norte que fluye hacia el oeste y gira al pasar por Japón; luego se incorpora a la corriente del Pacífico norte, que la lleva hacia Norteamérica. Cuando nuestra molécula vuelve a pasar cerca de California se acerca a la superficie y se evapora en la atmósfera, donde unas nubes están empezando a formarse.

Los vientos dominantes empujan la gruesa masa de nubes de lluvia hacia el este, a través del desierto del suroeste de Estados Unidos y hasta el terreno alto de las Montañas Rocosas. Las nubes se elevan a alturas mayores y más frías, y comienza

a llover. En algún momento nuestra molécula baja a la Tierra como parte de una gota de lluvia; sigue un caminito sinuoso hasta encontrar un riachuelo, luego un arroyo, un torrente y finalmente un río crecido que se desborda de sus orillas. Hasta este momento los movimientos de la partícula de agua han sido más bien rápidos: uno o dos años para darle vuelta a todo el océano Pacífico, uno o dos días en las nubes y en forma de lluvia, más o menos una semana en su camino por el terreno montañoso. Pero ahora que penetró profundamente en la tierra y se mezcló con un enorme acuífero oculto, la molécula puede pasar muchos miles de años vagando por el reino subterráneo.

Aquí es donde las actividades humanas alteran el viejo ritmo natural, pues las granjas, siempre sedientas, bombean inmensas cantidades de agua profunda para mantener la agricultura en el sudoeste semiárido. Los acuíferos son así despojados de su agua a un ritmo imposible de sostener, y se están secando. Nuestra molécula sufre este destino y vuelve a salir a la superficie, ahora sobre un maizal en Texas, donde rápidamente se evapora de nuevo en un cielo sin nubes y continúa su viaje hacia el este.

Éste es un ciclo sin fin. Algunas moléculas se separan temporalmente en iones de hidronio e hidroxilo, sólo para recombinarse en nuevas moléculas de agua con nuevos compañeros atómicos. Otras moléculas se congelan en el grueso hielo antártico y permanecen encerradas allí durante millones de años. Algunas más experimentan reacciones químicas para formar parte de minerales arcillosos del suelo.

La vida también se ha convertido en parte integral del ciclo del agua. Las plantas atrapan moléculas de agua y dióxido de carbono y las combinan, gracias al proceso de la fotosíntesis, impulsado por luz solar, para fabricar raíces, tallos, hojas y

frutas. Cuando esos tejidos vegetales, ricos en nutrientes, son devorados por animales y despedazados gracias al milagro metabólico de la respiración, los productos de desecho que exhalamos en cada aliento no son más que moléculas de dióxido de carbono y agua vueltas a armar.

El ciclo del agua profunda

A mediados de la década de 1980 los especialistas en ciencias de la Tierra comenzaron a pensar seriamente sobre el agua a escala global, porque el ciclo del agua superficial no puede ser toda la historia. Sabemos que los magmas que se forman decenas o cientos de kilómetros bajo la superficie contienen suficiente agua para provocar explosiones volcánicas, así que podemos suponer que los minerales de silicato que se encuentran cristalizados en las profundidades de nuestro planeta de algún modo deben atrapar H_2O. Debe existir una parte del ciclo del agua profunda y oculta que nos ayudaría a entender cómo y cuándo la Tierra se convirtió en el planeta bañado por océanos que conocemos hoy.

La investigación experimental sobre el agua de las profundidades se ha concentrado en la posibilidad de que la mayor parte de los minerales —la olivino, el piroxeno, el granate y sus variantes, más densas, en las profundidades de la Tierra— puedan incorporar pequeñas cantidades de agua en las condiciones que predominan en el manto. Durante la década de 1990 el estudio del agua en minerales con «anhidrosis nominal» se convirtió en un eje de la investigación mineralógica de altas presiones, y arrojó resultados sorprendentes. Se encontró que a altas presiones y temperaturas a algunos minerales les resulta relativamente fácil incorporar montones de átomos de

hidrógeno, que son el equivalente mineralógico del agua (porque los átomos de hidrógeno se combinan con el oxígeno de estos minerales). Los minerales que inevitablemente son secos en los ambientes con menores presiones y temperaturas de la corteza más superficial —donde el vulcanismo explosivo expulsa toda el agua que pueda encontrarse— pueden ser bastante húmedos en las profundidades del manto.

En principio la estrategia experimental es bastante sencilla. Se toma una muestra de olivino o de piroxeno, se agrega agua y calor, se exprime y se observa a dónde va el agua. En la práctica, sin embargo, no es tan fácil. Para poder reproducir las condiciones de las profundidades del manto terrestre la muestra debe someterse a presiones cientos de miles de veces mayores que la presión atmosférica (equivalentes a millones de kilogramos por centímetro cuadrado) y calentarse al mismo tiempo a temperaturas tan altas como 2 mil grados Celsius. Para logar esta imponente hazaña los científicos echan mano de dos estrategias complementarias de alta presión.

Algunos usan prensas gigantescas, tan grandes como una habitación, que ejercen toneladas de presión sobre una diminuta muestra; se trata de versiones sofisticadas de la bomba de presión que Hat Yoder usó hace medio siglo. Un arreglo experimental que se usa con frecuencia requiere cuatro etapas anidadas, como muñecas rusas: cada etapa rodea y abraza a la siguiente, y así concentra presiones enormes en un volumen cada vez más pequeño. Primero un par de gigantescas placas metálicas aprietan por arriba y por abajo con una fuerza sorprendente que puede alcanzar miles de toneladas. Esas placas enormes sostienen, como si fueran un tornillo de banco, la segunda etapa, que consiste en seis yunques curvos de acero entrelazados —tres arriba y tres abajo— que a su vez presionan uniformemente en todas direcciones una tercera etapa, forma-

da por un grupo de ocho yunques de carburo de tungsteno en forma de cubo. La muestra de mineral pulverizado y agua debe encerrarse firmemente dentro de la cuarta etapa, la más profunda, muchas veces con un recubrimiento de oro o de platino para que los reactivos no se chorreen por los lados. Como si generar estas presiones no fuera suficiente, la muestra también debe cocerse con calentadores eléctricos colocados dentro del recipiente de la muestra, y la temperatura debe monitorearse en forma continua con un delicado aro de alambre especial, llamado termocupla.

Otro enfoque experimental popular que sirve para reproducir las condiciones de las profundidades de la Tierra es la celda de yunque de diamante, que genera presiones extremas al empujar uno contra otro dos diamantes de puntas planas. Primero se toman dos diamantes típicos de medio quilate, con corte de brillante, como las piedras de los viejos anillos de boda, y se pule el extremo inferior para conseguir una superficie plana y circular de un milímetro de diámetro; esta superficie se convertirá en la cara del yunque. Luego los diamantes se montan en una prensa de metal alineada con gran precisión, y entre ellos se coloca un delgado trozo de metal al que se le ha hecho un agujerito. El agujero se centra respecto a los yunques de diamante, se llena con agua y mineral pulverizado, y se presiona. Para crear una presión tremenda sólo tiene que ejercerse sobre los diamantes una fuerza relativamente modesta, porque los yunques son muy pequeños y concentran la fuerza. Las celdas de yunque de diamante han conseguido presiones récord, iguales a los tres millones de atmósferas que se encuentran en el núcleo interno de la Tierra. La belleza de la celda de yunque de diamante es que puedes ver tu muestra bajo presión si miras a través del diamante transparente. Se puede usar una batería de técnicas de espectroscopía analítica, y es fácil

calentar la muestra hasta condiciones parecidas a las del manto con un láser de alto poder, que también puede atravesar los yunques transparentes de diamante.

Si todo funciona como debe: si se alcanzan y se mantienen las presiones y las temperaturas deseadas, si la termocupla no se rompe y si la muestra no se escurre, entonces comienza el delicado trabajo analítico. Es fácil reconocer algunos minerales que contienen agua, como las arcillas y las micas, pero ¿cómo mides unas cuantas partes de agua por millón en una muestra seca? La sonda de iones es una opción; su alta sensibilidad y su resolución espacial permitió que Erik Hauri descubriera rastros de agua en el vidrio volcánico de la Luna. La espectroscopía infrarroja, que puede revelar enlaces característicos entre el oxígeno y el hidrógeno, es otra herramienta útil. Los nuevos lazos que se forman entre el hidrógeno y el oxígeno modifican la forma en que las radiaciones infrarrojas interactúan con un cristal, y esos cambios pueden revelar el agua que se encuentra dentro de la estructura mineral. Sin embargo, algunos colegas muy precavidos (o rivales científicos que no quieren quedar fuera de la jugada) siempre invocarán la posibilidad de que los experimentos fallen o de que las técnicas analíticas no sean lo suficientemente sensibles. Una sola inclusión fluida, es decir una diminuta burbuja de agua, demasiado pequeña para verse con un microscopio, puede arrojar una señal falsa cuando se trata de mediciones tan quisquillosas.

Como ocurre con cualquier nueva tentativa científica, tomó un tiempo perfeccionar estos experimentos, pero cuanto más buscaron los científicos más minerales encontraron que son buenos candidatos para contener agua en las profundidades. La olivino y el piroxeno en la parte inferior de la corteza son bastante secos; no contienen más de una diezmilésima parte

de agua. Pero si las condiciones de presión del manto se elevan a 100 mil atmósferas y la temperatura a mil grados Celsius la olivino se transforma en wadsleíta, que puede incorporar un sorprendente tres por ciento de agua. La capa de la Tierra que corresponde a estas condiciones, la zona de transición del manto, entre 400 y 650 kilómetros de profundidad, es uno de los lugares más húmedos del planeta, y puede contener hasta nueve veces más agua que todos los océanos. Los minerales de la parte inferior del manto son menos húmedos, pero lo compensan con su enorme volumen, que equivale a la mitad de la Tierra. Así que se estima que el manto inferior contiene dieciséis veces más agua que todos los océanos. Es probable que existan otros minerales ricos en agua y que el núcleo de hierro también contenga mucho hidrógeno, así que las profundidades de nuestro planeta pueden contener más de ochenta veces el agua de los océanos.

Primer océano

Algunos cálculos conservadores arrojan que la cantidad original de volátiles de la proto-Tierra era cien veces más alta que en la actualidad. En efecto, uno de los retos principales para modelar la historia de los volátiles de la Tierra es averiguar cuántos se perdieron y cómo se escaparon.

De algunas cosas sí podemos estar seguros. Desde el primer día se liberaron cantidades prodigiosas de volátiles del interior de la Tierra, que salieron expulsados con cantidades inmensas de vapor durante las explosiones de los megavolcanes para formar parte de una atmósfera cada vez más espesa. Durante los primeros millones de años de existencia de la proto-Tierra esa atmósfera temprana puede haber sido mucho más densa que

la del planeta moderno. Es posible que el agua haya emergido a la superficie en forma líquida; durante unas decenas de millones de años enfrió las primeras rocas y formó mares amplios y poco profundos.

Y luego el Gran Impacto dio al traste con todo. Casi todas la moléculas que habían conseguido salir a la superficie se perdieron en el espacio, como si alguien hubiera presionado un gran botón de *reinicio*. No tenemos ningún cálculo confiable sobre qué proporción de las reservas de nitrógeno, agua y otros volátiles de la Tierra se perdieron durante ese acontecimiento, pero fue muy grande. Durante los siguientes quinientos millones de años se sucedieron docenas de impactos más pequeños, de rocas de alrededor de un kilómetro de diámetro, cada una de las cuales vaporizó una parte importante de los océanos y disminuyó aún más el inventario de volátiles.

Sin embargo, un millón de años después del Gran Impacto el vapor de agua se había convertido nuevamente en el componente principal de la atmósfera primordial y había formado una tempestad de nubes negras, vientos poderosos, relámpagos devastadores y una lluvia torrencial e incesante. La corteza de basalto se enfrió y se endureció bajo el azote de la tormenta, y las cuencas bajas se llenaron gradualmente de agua para formar lentamente los primeros océanos. Durante un tiempo, conforme la delgada capa de agua de la superficie entraba en contacto con las grietas y fisuras que se abrían en las rocas calientes y exhalaban enormes géiseres de vapor ardiente y agua supercalentada, los mares invasores formaron un sauna planetario. Estas intensas interacciones entre el agua y las rocas sirvieron para apurar el enfriamiento de la corteza e hicieron lugar para estanques profundos, luego lagos y finalmente océanos.

No conocemos el momento exacto en el que se formaron los océanos, pero han surgido algunas pruebas interesantes en forma de los cristales más antiguos de la Tierra. Entre las rocas más antiguas de la Tierra están unos sedimentos de unos tres mil millones de años de edad que se encuentran en los áridos terrenos conocidos como Jack Hills, una zona ovejera en el occidente de Australia. Esos sedimentos, formados por minerales y fragmentos de roca finos como arena, deben haberse desprendido por erosión de formaciones rocosas mucho más antiguas aún. Una diminuta proporción de esos granos de arena, no más de uno en un millón, está hecho del mineral circón: silicato de circonio ($ZrSiO_4$), uno de los materiales más duros de la naturaleza.

Los granos de circón, en general más pequeños que el punto al final de esta oración, se formaron originalmente como minerales secundarios en las rocas ígneas. Imagínate que el basalto se solidifica a partir de un magma que apenas contiene una traza del elemento circonio. La mayor parte de los elementos químicos, ya sean raros o comunes, entran fácilmente en las estructuras cristalinas del piroxeno, la olivino y el feldespato. Pero al circonio no le gusta convivir con esos minerales, así que busca a los de su propia clase y forma diminutos cristales aislados de circón.

Existen diferentes factores que actúan al unísono para hacer de estos cristales de circonio, tan fáciles de ignorar, una fuente única de información sobre la Tierra antigua. Para empezar, los circones duran casi para siempre (al menos toda la historia de la Tierra). Un cristal de circón puede erosionarse de una roca (tal vez la roca ígnea donde primero se cristalizó), luego volverse parte de una roca de arenisca sedimentaria, y luego erosionarse de nuevo y de nuevo y de nuevo durante miles de millones de años. Ese mismo grano de circón puede reciclarse

a lo largo de una docena de formaciones diferentes de roca sedimentaria.

En segundo lugar, los cristales de circón sirven para medir el tiempo porque incorporan con facilidad el elemento uranio, que puede constituir uno por ciento o más de sus átomos. El uranio radiactivo, que tiene una vida media de unos 4500 millones de años, es el gran cronómetro de la naturaleza. Una vez que se forma un cristal de circón sus átomos de uranio quedan encerrados y comienzan a decaer a un ritmo estable; en promedio, la mitad de los átomos decae cada 4500 millones de años y se transforma en un átomo estable de plomo. La tasa de decaimiento de los átomos padre de uranio en átomos hijo de plomo nos permite calcular con precisión la edad del cristal de circón.

Para terminar, en el circón dos de cada tres átomos son de oxígeno, lo cual nos da una pista sobre la temperatura a la que se formó. Recuerda que una de las líneas de evidencia sobre la formación de Marte era la proporción característica de isótopos estables del oxígeno: la Tierra y la Luna tienen proporciones idénticas de oxígeno-16 y oxígeno-18, lo que implica que se formaron a una distancia parecida del Sol. En una línea de razonamiento similar, la proporción de oxígeno-16 y oxígeno-18 en un cristal de circón indica la temperatura a la que creció: las muestras enriquecidas con oxígeno-18, más pesado, indican una menor temperatura de formación. Para las rocas ígneas esta temperatura puede ser un indicador muy sensible del contenido de agua en el magma a partir del cual crecieron los cristales de circón, porque el agua reduce la temperatura a la que se forman los cristales. Es más: el agua cercana a la superficie de la Tierra tiende a ser aún más rica en oxígeno pesado, de modo que se interpreta que los cristales de

circón, que tienen un contenido extremadamente alto de oxígeno-18, interactuaron con el agua de la superficie.

Así pues, los cristales de circón de las primeras rocas de la Tierra pueden sobrevivir muchos ciclos de erosión y deposición y conservar detalles sobre la edad, la temperatura y el contenido de agua de su ambiente original. ¡Y toda esta información se obtiene a partir de cristales casi imposibles de ver sin un microscopio!

La conclusión es que muchos de los cristales de circón de las Jack Hills de Australia tienen más de cuatro mil millones de años; uno de esos gastados granos de arena incluso alcanzó la notable edad de 4400 millones de años. Este viejísimo cristal de circón —de hecho, el fragmento sólido más antiguo que se conoce de la Tierra— tiene una composición de isótopos de oxígeno sorprendentemente alta. Algunos científicos han llegado a la conclusión de que hace 4400 millones de años, cuando la Tierra apenas tenía unos ciento cincuenta millones de años de edad, la superficie era relativamente fría y húmeda: había océanos.

Otros expertos no están tan seguros, pues señalan que los cristales de circón pueden llegar a ser increíblemente complicados: ese grano de arena de 4400 millones de años, así como sus compañeros un poco más jóvenes de las Jack Hills, tiene un antiguo núcleo de cristal. Pero los mapas detallados de cada cristal individual revelan capas concéntricas de circón que crecieron alrededor de capas más antiguas. No es inusual que un solo grano tenga, entre el núcleo y la orilla, un rango de edades de mil millones de años, con variaciones correspondientemente complejas de isótopos de oxígeno. Si el núcleo original se vio alterado durante pulsos de crecimiento más recientes, tal vez no podamos conocer la verdadera naturaleza de la antigua superficie terrestre.

Pase lo que pase con la historia del circón, la mayor parte de los expertos concuerdan en que no mucho después de cien millones de años tras el Gran Impacto la Tierra se había convertido en un brillante mundo azul y acuático, rodeado por un océano global de un kilómetro de profundidad. Desde el espacio se habría visto como una canica lapislázuli, con algunos blancos remolinos de nubes, sí, pero básicamente de un azul extraordinario. (Los colores del océano pueden explicarse en términos físicos sencillos. La luz que baña la superficie está compuesta por todos los colores del arcoíris —rojo, amarillo, verde y azul—, pero el agua absorbe más fácilmente la parte roja del espectro, así que nuestros ojos perciben sobre todo las longitudes de onda azules, que predominan en la luz que se dispersa).

¿Y qué hay con la tierra? Hoy los continentes ocupan casi una tercera parte de la superficie de la Tierra, pero en los albores del tiempo en nuestro planeta, durante el infernal eón Hadeano, los continentes todavía no se formaban. El azul mar primordial sólo se veía interrumpido por algunas islas volcánicas aisladas que asomaban su humeante cabeza sobre el agua. Los únicos rasgos que rompían la monotonía de las aguas eran sus formas cónicas y sus estrechas playas negras y pedregosas, que salpicaban el planeta desde los polos hasta el Ecuador.

Cuando pensamos sobre este primer océano global de la Tierra nos preguntamos cómo era. ¿Era caliente? Al principio probablemente sí, puesto que bajo él había un océano de magma que se enfriaba poco a poco. ¿Era dulce o salado? La sal es tal vez la característica más distintiva del agua de mar moderna, pero es razonable suponer que el primer océano de la Tierra comenzó siendo de agua dulce, con pocas sustancias químicas disueltas, y gradualmente adquirió la salinidad que tiene hoy. Y sin embargo, algunas evidencias recientes sugieren que

ese primer océano caliente pronto se volvió más salado que el actual. La sal de mesa común, el cloruro de sodio (NaCl), se disuelve muy fácilmente en agua caliente. En la actualidad más o menos la mitad de la sal de la Tierra se encuentra en domos de sal rodeados de tierra, y en otros depósitos de evaporitas que alguna vez fueron cuerpo de agua salada que se secaron. La mayor parte de esta sal se encuentra en gruesas capas subterráneas, pero durante los primeros quinientos millones de años de vida de la Tierra no había continentes que pudieran almacenar la sal. Así que la salinidad del primer océano debe haber sido hasta del doble que en el mundo actual. Además, en el agua de mar tibia también habrían estado presentes en mayores concentraciones otros elementos disueltos, sobre todo hierro, magnesio y calcio, predominantes en el basalto.

Los científicos también se preguntan si el océano hadeano era ácido o básico. El factor más determinante para controlar el pH y la salinidad del océano es el dióxido de carbono atmosférico. La mayor parte de los cálculos arrojan que el contenido de CO_2 de la atmósfera antigua era miles de veces más alto que el de hoy, de un poco menos de 400 partes por millón (aunque cada año nos acercamos más a ese nivel, y pronto lo rebasaremos). Que hubiera mucho más CO_2 en el aire hadeano significa que también había mucho más CO_2 en el agua, y esto debe haber acarreado consecuencias importantes tanto para el pH como para la salinidad. El dióxido de carbono se combina con el agua de lluvia para formar ácido carbónico, H_2CO_3. En el océano este carbonato se disocia parcialmente en iones de hidrógeno, que forman iones de hidronio (el H_3O+ de los ácidos) y bicarbonato (o HCO_3-). Esta adición neta de H+ vuelve más ácidos los océanos, tal vez a pH tan bajos como 5.5. Estas condiciones oceánicas tan ácidas probablemente aceleraron, a su vez, la meteorización del

basalto y de otras rocas, lo que añadió aún más solutos a un océano ya de por sí salado.

La paradoja del Sol tenue

Como si las detalladas historias sobre la formación del primer océano de la Tierra, a veces opuestas entre sí, no fueran lo suficientemente controversiales, hay otra gran vuelta de tuerca con la que debemos vérnosla: según observaciones astronómicas cada vez más sensibles y con cálculos astrofísicos, las estrellas como nuestro Sol experimentan un aumento de brillo lento pero inexorable a lo largo de sus vidas. Según estos cálculos el joven Sol de hace 4400 millones de años era entre 25 y 30 por ciento menos brillante que hoy. Es más: seguiría siendo incómodamente tenue por al menos otros 1500 millones de años. Si nuestro Sol actual se atenuara de pronto hasta ese nivel la Tierra entraría de inmediato en un estado de congelador; los océanos se congelarían por completo desde los polos hasta el Ecuador y la mayor parte de la vida en la Tierra perecería. Sólo los organismos más resistentes, la vida microbiana bajo la superficie y los animales que vivieran en zonas hidrotermales protegidas, asociadas con los volcanes, sobrevivirían un cambio climático tan catastrófico.

Pero si el antiguo Sol era tan frío, la Tierra debe haberse congelado rápidamente. Y sin embargo, existen claras evidencias geológicas de que hace cuatro mil millones de años existía mucha agua en la superficie. Es común encontrar sedimentos de entornos acuáticos someros y profundos. La vida comenzó y prosperó durante ese intervalo. ¿Entonces cómo pudo permanecer líquido el océano primordial?

Sin duda parte de las carencias caloríficas que provocaba tener un Sol mucho más tenue eran compensadas por una Tierra mucho más caliente. Tras la formación de la corteza a partir del océano de magma primigenio seguía habiendo mucha roca fundida y una gran actividad volcánica que calentaban la superficie. Este océano estaría continuamente calentado desde abajo, conforme la negra corteza se engrosaba y se enfriaba.

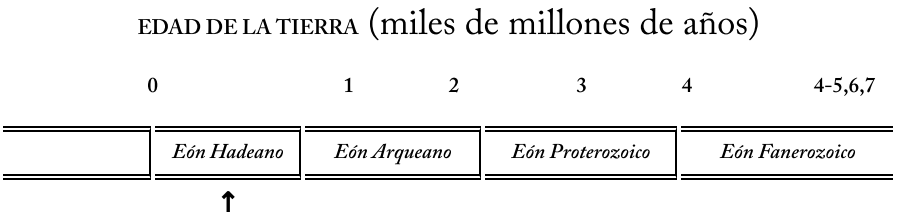
La principal hipótesis para explicar la paradoja del Sol tenue apunta a un exagerado efecto invernadero que contribuyó a elevar la temperatura y fue causado por una concentración extremadamente alta de dióxido de carbono en la atmósfera, tal vez más de diez veces la cantidad de nuestra atmósfera actual (las mismas altas concentraciones de CO_2 pudieron acidificar el océano e incrementar su salinidad).

Un segundo escenario postula de manera ingeniosa que la Tierra en su temprana fase negra y luego azul absorbió un porcentaje mucho más alto de luz solar que la superficie terrestre en la actualidad. Hoy los océanos absorben más luz solar que la Tierra, un efecto que posiblemente fue exagerado entonces a causa de la alta concentración de hierro en los primeros océanos. Este incremento en la absorción solar fue de la mano de una escasez de nubes que dispersaran la luz del Sol; hoy en día las partículas que producen las plantas, así como diversas sustancias químicas, desempeñan un papel fundamental en la nucleación de las nubes, pero hace miles de millones de años no había plantas que pudieran desencadenar la formación de las nubes.

Otra hipótesis más propone que en la atmósfera temprana existía una gran cantidad de metano, un gas con un poderoso efecto invernadero. Una consecuencia curiosa de una atmósfera rica en metano habrían sido reacciones químicas en lo alto de la atmósfera, donde la radiación ultravioleta habría desen-

cadenado la síntesis de una gran variedad de moléculas orgánicas, incluyendo algunos posibles componentes de la vida. Estas moléculas orgánicas habrían provocado una niebla densa, parecida al esmog, que habría transformado la Tierra azul en un mundo anaranjado, no muy diferente de Titán, la gran luna de Saturno. Así, aunque todavía no conocemos la combinación exacta de factores, contamos con suficientes explicaciones sobre la forma en que la Tierra se mantuvo por encima del punto de congelación.

Lo que podemos decir con seguridad es que una vez que se formó este océano global transformó las capas exteriores del planeta; esculpió la tierra, aceleró la evolución del reino mineral, cada vez más diverso, y el origen de la biosfera. El agua sigue haciendo maravillas en todos los aspectos de nuestra vida, como la concentradora de la riqueza mineral, como el principal agente de los cambios en la superficie y como el medio de la vida.



Capítulo 5

La Tierra gris

La primera corteza de granito

Edad de la Tierra: de 200 a 500 millones de años

La Tierra actual es un mundo de contrastes: una tercera parte tierra, dos terceras partes agua; desde el espacio parece una *mezcla* de azul, café, verde y remolinos blancos. No era así hace 4400 millones de años, cuando los únicos trocitos de tierra que sobresalían en la azul monotonía de los mares someros eran algunos pocos conos volcánicos de basalto negro dispersos por aquí y por allá. Todo eso estaba por cambiar con la invención del granito, la primera piedra de los continentes.

La historia de la Tierra es una saga de diversificación: de separación y concentración de elementos en nuevas rocas y minerales, en continentes y mares y finalmente en vida. Este tema se ha representado una y otra vez. Los planetas rocosos internos —Mercurio, Venus, la Tierra y Marte— se formaron cuando fuertes pulsos de viento solar separaron el hidrógeno y el helio de los seis grandes elementos, más pesados, y barrieron los elementos gaseosos más ligeros hacia el exterior, hacia el dominio de los planetas gigantes Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. En la Tierra, el pesado hierro fundido se asentó en

el centro conforme el núcleo metálico se separó del manto rico en peridotita. Una fundición parcial de la peridotita produjo basalto, una roca rica en silicio, calcio y aluminio, que se separó de la peridotita para formar la primera corteza de la Tierra, negra y delgada. Conforme el basalto emergió en la superficie, de la mano de violentas explosiones, el agua y otros volátiles se separaron del magma basáltico para formar el primer océano y la primera atmósfera. Cada paso, impulsado por el calor, separó y concentró los elementos; cada paso condujo a un planeta cada vez más estratificado y diferenciado.

El ascenso de los continentes fue otro paso importante en la diversificación de la Tierra. Cuando las capas exteriores de la corteza de basalto se enfriaron y se endurecieron formaron una especie de tapa que atrapó el calor del manto que se agitaba por debajo. El basalto, que recibía calor desde el interior, comenzó a fundirse a temperaturas relativamente bajas —unos helados 650 grados Celsius—, en especial en presencia de agua. Conforme aumentó la temperatura también lo hizo el porcentaje de basalto fundido: primero fue 5 por ciento, luego 10 por ciento y eventualmente 25 por ciento. Como un eco de la fundición de peridotita, el magma resultante tenía una composición radicalmente diferente de la roca basáltica huésped. Lo más llamativo es que esta nueva mezcla era mucho más rica en silicio, y tenía un aumento en sodio y potasio. También el agua se concentraba en este fluido ardiente, así como docenas de elementos traza: berilio, litio, uranio, circonio, tantalio y muchos más. Este nuevo magma rico en silicio era mucho menos denso que su antecesor, el basalto, así que resultó inevitable que se abriera paso hacia la superficie para formar el primer granito.

La mayor parte de los granitos contienen una mineralogía simple, de cuatro especies diferentes. En el granito abundan

cristales de cuarzo, transparentes e incoloros —puro óxido de silicio—; sus duros granos se erosionaron para producir las primeras playas arenosas blancas de la Tierra. Hubo dos clases de feldespato, uno rico en potasio y el otro en sodio, que le dieron a los primeros granitos de la Tierra su monótono color blanco grisáceo. Y dentro de cada granito se encuentra mezclado un cuarto mineral, más oscuro y rico en hierro, a veces bloques de piroxeno, a veces láminas de mica, a veces largos trozos de anfíbol. La próxima vez que veas una repisa de granito pulido o un lavabo de baño busca en ellos este sencillo grupo de cuatro minerales.

La presencia de elementos más raros con frecuencia provoca que se encuentren granos más pequeños de minerales adicionales como el circón, por ejemplo, que concentra el elemento circonio. En el capítulo anterior vimos que los diminutos cristales rojos de circón provenientes de las lejanas Jack Hills de Australia nos ofrecen pistas de un océano temprano hace 4400 millones de años. Esos mismos cristales, que parecen haberse formado en condiciones relativamente templadas y húmedas, también pueden apuntar a los comienzos de la formación de granito en un etapa temprana. Los circones de Jack Hills no sólo contienen el pesado isótopo de oxígeno característico de un origen frío y húmedo, sino que unos cuantos cristales de 4 mil millones de años de edad contienen inclusiones de cuarzo, un mineral que raramente se produjo antes del advenimiento del granito. Algunos expertos sugieren que estos viejos y fríos cristales de circón con cuarzo son los últimos restos de la primera corteza de granito.

Con el origen del granito ocurre por primera vez una divergencia importante entre la evolución mineral de la Tierra y la de algunos de sus vecinos planetarios. La formación de granito requiere que exista mucho basalto cerca de la superficie pla-

netaria, así como un intenso calor interno para volver a fundirlo. Los planetas Marte y Mercurio, así como la Luna terrestre, están dotados de la capa basáltica necesaria, pero son demasiado pequeños para fabricar mucho granito; carecen del calor interno necesario. Sin duda en esos mundos se generaron pequeños volúmenes de granito, pero nada parecido a los profundos continentes de granito de la Tierra.

Flotabilidad

La primera corteza de basalto negro de la Tierra, ablandada por el calor interior y con una densidad uniforme unas tres veces mayor que la del agua, nunca fue capaz de aguantar mucha topografía. Es posible que algunas pocas estructuras volcánicas se elevaran dos o tres kilómetros sobre el promedio, suficiente para que aparecieran algunas islas dispersas sobre el mar, pero antes de la aparición de los continentes no había grandes cadenas montañosas ni profundas cuencas oceánicas. El granito, que tiene una densidad promedio significativamente menor (aproximadamente 2.7 veces la del agua), vino a cambiar esa dinámica. El granito flota, inevitablemente, sobre el basalto y la peridotita y se apila en grandes montículos que se alzan varios kilómetros sobre la superficie, como un iceberg que flota en el agua.

El hielo, que es aproximadamente 10 por ciento menos denso que el agua, nos sirve como una analogía familiar. Esta diferencia de densidad provoca que más o menos 10 por ciento del volumen de un iceberg sobresalga del agua. Un escarpado iceberg de unos sesenta metros de alto suele tener expuestos unos nueve metros sobre la superficie del agua; de aquí la expresión «es la punta del iceberg». Del mismo modo, el gra-

nito es 10 por ciento menos denso que el basalto sobre el que flota. Cuando el basalto parcialmente fundido comenzó a generar capa sobre capa de granito, comenzaron a formarse protuberancias parecidas a un iceberg. Un cuerpo de granito de un kilómetro de espesor habría producido una pequeña protuberancia de casi doscientos metros sobre el nivel promedio de la corteza basáltica. Pero a lo largo del tiempo las masas de corteza granítica alcanzaron espesores de muchos kilómetros, y las masas continentales, profundamente ancladas en la corteza, se alzaron más y más sobre los océanos; algunas cadenas montañosas se elevaron muchos kilómetros sobre la superficie del agua. Las Montañas Rocosas en el oeste de Estados Unidos, con sus raíces de granito de hasta sesenta y cinco kilómetros de profundidad, exhiben muchos picos de más de cuatro mil metros de altura. Esta gran columna vertebral del territorio norteamericano se yergue como un testimonio de la flotabilidad del granito.

En 1970, cuando cursé mi primera clase de geología en el MIT, el poder de la flotabilidad en el cambio geológico seguía constituyendo la ortodoxia en los libros de texto (usábamos por entonces la edición de 1965 de *Principios de Geología Física*, el clásico, profusamente ilustrado, del geólogo británico Arthur Holmes). Se llamaba «isostasia». La fuerza que impulsaba la «tectónica vertical» era el «reajuste isostático». Había un lindo grabado, casi idéntico a los de los libros de texto de geología del siglo XIX, que mostraba una línea de bloques de madera rectangulares de diferentes tamaños que flotaban en agua. Los bloques más altos se proyectaban más sobre el agua, igual que una montaña. Se explicaba que las cuencas oceánicas se habían llenado de gruesas capas de sedimentos, y que esos sedimentos se habían fundido para formar más cuerpos graníticos. Aprendimos que, a continuación, las montañas se eleva-

ron a partir de esos núcleos graníticos flotantes. Por entonces tenía mucho sentido, y sigue siendo la hipótesis principal sobre la formación de la primera corteza de la Tierra, hace más de cuatro mil millones de años.

Muy al principio de la historia de la Tierra, tal vez incluso durante los primeros doscientos millones de años, deben haber comenzado a formarse pequeñas masas terrestres sobre los puntos calientes, cuando algunas acumulaciones profundas de basalto se fundieron parcialmente. En esos tiempos remotos, la tectónica vertical y la isostasia deben haber sido las fuerzas dominantes, tal como enseñó Arthur Holmes. Los primeros trozos continentales de granito, totalmente yermos y estériles, eran constantemente barridos y castigados por el viento y por las intensas olas. Los fragmentos de cuarzo erosionados se acumularon lentamente para formar pequeñas playas de arena, y los feldespatos se convirtieron en capas delgadas de suelos ricos en arcillas. Las primeras islas graníticas eran pequeñas, aisladas y más bien chatas; nada indicaba la escala de los continentes que formarían con el tiempo.

¿Otra vez un impacto?

¿Cómo pudo la Tierra pasar de ser un mundo basáltico salpicado de volcanes a un planeta con grandes continentes de basalto gris? ¿Cómo pudieron expandirse las primeras islas solitarias de granito hasta convertirse en masas de tierra que cubren hemisferios completos, como las que vemos hoy? Los científicos de la Tierra nunca han tenido reparos en inventar hipótesis. Una de las ideas más intrigantes propone que los continentes se formaron gracias a una secuencia de eventos

desencadenada ni más ni menos que por un asteroide perdido, ése ya familiar agente del cambio.

Tras la destrucción de Theia y la formación de la Luna siguieron ocurriendo enormes impactos ocasionales durante mil millones de años. Esto es incontrovertible. Los expertos calculan que durante sus eones formativos deben haber chocado contra la Tierra docenas de grandes asteroides, de hasta ciento cincuenta kilómetros de longitud, restos errantes de la era de la formación de los planetas. Imagínate una escena hace cuatro mil millones de años: bajo una joven corteza oceánica suben columnas de magma ardiente. Del interior de la Tierra deben haber emergido muchas docenas, si no cientos, de columnas como éstas para transferir al exterior el calor interno mediante el eficiente proceso de convección. Sobre cada columna han hecho erupción grandes volcanes que arrojan lavas basálticas, incluso ahora que la refundición de la corteza de basalto ha generado un componente granítico que ha aumentado el espesor del suelo.

Y entonces llega la catástrofe: un asteroide de cincuenta kilómetros de diámetro se estrella en el conjunto volcánico y extermina cualquier señal de tierra en un radio de quinientos kilómetros. El impacto produce un gigantesco lago de lava en forma de cuenco y hace que sobre todas las superficies cercanas caiga una lluvia de lava fundida y rocas despedazadas. Este terrible ultraje cósmico bloquea la columna del manto, que tiene que encontrar algún otro camino hacia la superficie.

Según este ingenioso escenario, tras el impacto la columna cambia su camino para reaparecer debajo de un minicontinente con raíces basálticas y una creciente capa de granito. Una vez que se encuentra bajo esta gruesa tapa de basalto, que atrapa el calor, la nueva fuente calorífica produce nuevos y

abundantes pulsos de granito, lo que expande y ensancha aún más el suelo.

Esta historia es imposible de probar, pero puede ser parte de la historia de los primeros continentes terrestres. Mil millones de años de tectónica vertical, y la colisión de un asteroide, habrían generado un inventario cada vez mayor de islas volcánicas oceánicas con núcleos combinados de basalto y granito. La tierra emergió gradualmente del mar. Hace cuatro mil millones de años algunas grandes islas, distribuidas en forma aleatoria por el globo terrestre, pueden haber ocupado un modesto porcentaje de la superficie de la Tierra.

Pero entonces entró en juego la tectónica de placas, y la evolución de la superficie terrestre metió el acelerador.

Continentes a la deriva

El descubrimiento de que la tectónica de placas es el proceso geológico dominante en la Tierra es una historia en sí misma, y abarca la mayor parte de la ciencia moderna. Si bien fue anticipada durante al menos cuatro siglos de observaciones, la idea de que los continentes pueden migrar de algún modo sobre la superficie de la Tierra resultó al principio vaga y herética, y sólo se le prestó atención y resultó ampliamente aceptada tras una sucesión furiosa de descubrimientos internacionales en la década de 1960 Pero una vez que las evidencias comenzaron a acumularse, las ciencias de la Tierra experimentaron uno de los cambios de paradigma más rápidos en la historia de la ciencia. De hecho, durante los cinco años que trabajé en el MIT, a mediados de la década de 1970, tuvieron que reescribir-

se todos los libros de texto de geología para eliminar, casi por completo, la vieja ortodoxia de la tectónica vertical.

En retrospectiva, algunas de las evidencias contra la tectónica vertical deberían haber resultado evidentes. Por más altas que sean hoy las Montañas Rocosas, no son competencia para el monte Everest, con sus 11 kilómetros de altura, ni para la poderosa cordillera de los Himalayas. La fosa oceánica más profunda de la Tierra, cerca de las islas Marianas en el Pacífico sur, tiene unos sorprendentes once kilómetros de profundidad, que contrastan con los apenas tres kilómetros de profundidad promedio de los océanos. Estos extremos topográficos no podrían durar en un mundo isostático. La tectónica vertical no podía ser el final de la historia.

Las primeras pistas de la tectónica lateral —el papel de los movimientos laterales en la evolución geológica de la Tierra— vienen de la mano de los primeros mapas precisos de la costa del Nuevo Mundo. A principios del siglo XVII ya resultaba evidente la sorprendente concordancia que existía entre la costa este de las Américas y las costas occidentales de Europa y África. Todo apuntaba a que se trataba de piezas de un viejo rompecabezas: la misma forma sinuosa, las mismas bahías y protuberancias, los contornos redondeados del suroeste de África y la sugerente curva que traza hacia el este el extremo de América del Sur.

Se propusieron varias hipótesis extravagantes para explicar esta tentadora coincidencia continental transatlántica. El astrónomo William Henry Pickering de la Universidad de Harvard, que apoyó la teoría de George Darwin de la fisión como origen de la Luna (de una masa fundida que fue lanzada hacia el espacio desde una Tierra que giraba vertiginosamente), propuso que al tiempo que la Luna se vio arrancada del océano Pacífico, del otro lado de la Tierra el océano Atlántico se des-

garró. Otros vieron la mano de Dios en esta gran *S* atlántica. Tal vez las costas del Atlántico eran las orillas del gran diluvio de Noé, que había sido desatado mil años antes para crear el gran océano y «dividir las tierras».

Una investigación geológica sistemática podría haber ayudado a resolver este problema, pero hace cuatro siglos la geología todavía no había sido ni bautizada, y mucho menos emprendida en forma sistemática. La minería y la agricultura, las fuerzas impulsoras de la economía que permitieron las primeras investigaciones geológicas a finales del siglo XVIII, eran asuntos estrictamente estatales y nacionales. No se hacían muchos esfuerzos por hacer coincidir formaciones geológicas más allá de las fronteras políticas, y no se pensaba que las riquezas que se hallaban en un principado pudieran estar conectadas de algún modo con las de cualquier otro lugar. El oro estaba, literalmente, donde lo encontrabas. En un ambiente tan nacionalista lo de empatar rasgos geológicos a través de la gran extensión del océano Atlántico no era una prioridad.

Las primeras comparaciones geológicas transatlánticas que se hicieron con cierto grado de detalle fueron emprendidas por un estudioso inverosímil, el meteorólogo Alfred Wegener, que pasó buena parte de su carrera en el Ártico. (Murió a la edad de cincuenta años durante una heroica misión de rescate invernal sobre la helada capa de hielo de Groenlandia). Aunque durante su vida profesional se dedicó principalmente a estudiar los orígenes del clima, su trabajo más memorable y duradero tiene que ver con lo que llamó «deriva continental», una contribución temprana, y muy desdeñada, a la tectónica lateral. Su inspiración para emprender esta extraña digresión geológica ocurrió durante la primera guerra mundial, cuando sirvió como teniente de reserva en el ejército alemán. Durante la campaña en Bélgica recibió un disparo en el cuello, así que

fue relevado del servicio en el frente y se le permitió dedicar su convalecencia al estudio.

Como muchos de sus predecesores a Wegener le sorprendió el aparente empate de los continentes a ambos lados del océano Atlántico, aunque muchos científicos lo desecharon como una simple coincidencia. Wegener decidió ampliar su perspectiva y notó que podían verse coincidencias similares entre diversas costas de África del Este, Antártida, India y Australia. De hecho, todos los continentes de la Tierra podían agruparse elegantemente para formar un supercontinente, que Wegener llamó Pangea (del griego «todas las tierras»). Wegener y un puñado de simpatizantes citaron evidencias de algunas investigaciones geológicas recientemente publicadas sobre las regiones costeras de Europa, África y las Américas que revelaban correlaciones intrigantes a ambos lados del Atlántico. Algunas grandes regiones mineras, como las reservas de oro y diamantes de Brasil y de Sudáfrica, parecen formar un solo depósito inmenso cuando se yuxtaponen los mapas de los continentes. Del mismo modo, las capas de roca que alojan un característico helecho fósil, *Glossopetris*, y el reptil extinto *Mesosaurus* se alinean casi perfectamente. Wegener argumentaba que estas correlaciones geológicas y paleontológicas, tan detalladas, no podían ser una simple coincidencia.

La hipótesis de la deriva continental de Wegener se publicó por primera vez en 1915. Le siguieron tres ediciones en alemán, cada una más detallada que la anterior, así como una traducción al inglés en 1924, titulada *The origins of the continents and oceans* (*Los orígenes de los continentes y los océanos*) y muchas otras ediciones. Siguieron llegando datos que daban sustento a la idea de que los continentes estuvieron unidos alguna vez. En 1917 un comité de paleontólogos catalogó más de una docena de casos de estratos con fósiles que se correspondían per-

fectamente a través de los océanos, lo que interpretaron como que en el pasado existió alguna clase de puente entre las masas terrestres. El geólogo sudafricano James Du Toit, especialmente deslumbrado con las ideas de Wegener, obtuvo una beca del Instituto Carnegie para visitar el este de América del Sur. Du Toit registró más ejemplos de correspondencias transoceánicas, como minerales, rocas y fósiles idénticos a los del otro lado.

Y sin embargo, a pesar de la acumulación de datos en favor de la alineación continental, la comunidad de científicos de la Tierra no se conmovió. A falta de un mecanismo verosímil para estos vagabundeos de escala continental, muchos geólogos despreciaron abiertamente las conjeturas de Wegener. Parecía apuntalar sus críticas la primera ley del movimiento de Newton, que dice que nada sucede si no es por una fuerza. Hasta que no pudiera invocarse una fuerza formidable que moviera las cosas a escala global la deriva continental no pasaría de ser la chifladura de un geólogo aficionado. El físico Harold Jeffreys, de Cambridge, resumió así el punto de vista de los británicos en 1923: «Las causas físicas que Wegener ofrece son ridículamente inadecuadas». En Estados Unidos los geólogos tampoco estaban convencidos. Rollin T. Chamberlin, del departamento de geología de la Universidad de Chicago, atacó la deriva continental en un simposio en 1926: «En general, la hipótesis de Wegener es de lo más caprichosa, pues se toma considerables libertades con nuestro planeta, y está menos limitada o atada a los hechos que la mayor parte de sus teorías rivales… Para poder creer la hipótesis de Wegener debemos olvidar todo lo que hemos aprendido durante los últimos setenta años y empezar de nuevo».

Y sin embargo, unos cuantos geocientíficos estuvieron lo suficientemente intrigados por los hallazgos de Wegener y sus

seguidores para inventar nuevos mecanismos para las derivas continentales. Una de estas escuelas propuso que la Tierra se está encogiendo, tal vez por enfriamiento o por el colapso de espacios llenos de gas en sus profundidades, y por ello partes de la superficie tienen que contraerse, como una bóveda que colapsa. Según este modelo, por lo demás insostenible, en el pasado los continentes cubrieron una extensión continua de tierra, desde las costas occidentales de América hasta las costas del este de África y de Asia. Se pensaba que el océano Atlántico actual fue alguna vez una enorme bóveda de tierra que colapsó y que se hundió en el manto. La geometría euclidiana básica dio al traste con el modelo de la Tierra que se encoge: una simple bóveda puede colapsar, pero si transfieres la idea a una esfera ya no hay espacio para que colapse un volumen continental que cubre el área del océano Atlántico.

Otro grupo hizo una propuesta antitética: que la Tierra había estado expandiéndose, como un globo, a lo largo del tiempo geológico. Había una vez una sola corteza continental que se agrietó y se rompió en pedazos conforme el planeta se infló (según algunos por la producción de gases calientes en expansión). Y en efecto, si reproduces en reversa un video imaginario de esta Tierra supuestamente en expansión llegarás a un estado en el que todos los continentes embonan a la perfección para cubrir una esfera que tiene aproximadamente tres quintas partes del diámetro de la Tierra actual. A falta de algún otro mecanismo aceptado para la formación del Atlántico esta hipótesis perduró en algunos círculos geológicos desde 1920 hasta finales de 1960, cuando la remplazó una idea nueva y más convincente.

Las montañas ocultas

Ahora avancemos rápidamente hasta los años de la posguerra, una época de una tremenda innovación tecnológica y un gran optimismo en la ciencia. En esos años se desarrollaron dos tecnologías importantes en la guerra contra los submarinos, ambas desclasificadas y adoptadas por los oceanógrafos en la década de 1950, que condujeron a algunos descubrimientos fundamentales sobre nuestro dinámico planeta.

El sonar, que usa ondas de sonido para medir distancias y direcciones, es una tecnología centenaria que le resultará familiar a cualquiera que haya visto películas hollywoodenses de submarinos. Primero se escucha un PING, al que le hace eco, un poco después, un *ping* más débil. Una onda de sonido rebota contra el sólido casco de un submarino. (El efecto que esto produce en el espectador depende de si la película se centra en la perspectiva del cazador o del cazado). «PING… *ping*», «PING… *ping*», «PING… *ping*»: los ecos se suceden más rápidamente cuando se determina la ubicación del submarino. La música se vuelve más tensa; se disparan las cargas de profundidad.

Los científicos pueden usar exactamente la misma tecnología para sondear las profundidades del océano y, por lo tanto, la topografía del suelo marino, incluso los valles y las fosas marinas más profundos. En fecha tan temprana como la década de 1870 científicos británicos a bordo del *HMS Challenger* usaron sondas de profundidad primitivas y reportaron indicios de grandes montañas en el suelo oceánico a mitad del Atlántico, un resultado muy intrigante que algunos románticos contemporáneos asociaron con el continente perdido de Atlántida. La tecnología primitiva de ecosondas, que se desarrolló originalmente para detectar icebergs tras la tragedia del *Titanic* en 1912, avanzó rápidamente durante la primera guerra mundial, cuando comenzaron a merodear por las aguas los submarinos alemanes. La década de 1920 vio la primera aplica-

ción sistemática del sonar para mapear el suelo oceánico; los científicos pronto se dieron cuenta de que bajo todos los océanos de la Tierra yacen enormes cordilleras montañosas. Sin embargo, no se dio gran relevancia a las implicaciones geológicas de estos primeros sondeos oceánicos, y los esfuerzos oceanográficos se vieron drásticamente reducidos por la gran depresión y la inminente segunda guerra mundial.

Tras la guerra los oceanógrafos estaban armados con una nueva generación de detectores de sonar muy sensibles, capaces no sólo de mapear la topografía del fondo oceánico completo, sino también de detectar las ondas de sonido que reflejan capas de rocas aún más profundas. Fue fácil confirmar algunos rasgos generales del suelo del océano Atlántico, por ejemplo que las plataformas continentales se hacen más profundas conforme te alejas de la mayor parte de las costas del Atlántico, por distancias de hasta cientos de kilómetros. Las orillas de estas plataformas continentales se caracterizan por una súbita caída hacia una llanura abisal de tres kilómetros de profundidad y dos mil kilómetros de ancho, mucho más ancha y plana que cualquier llanura en tierra firme. Y el océano está bisecado por una enorme cadena montañosa, la dorsal mesoatlántica.

Todo esto concordaba con los descubrimientos anteriores, pero el espesor de la corteza oceánica resultó una enorme sorpresa. Los geólogos habían predicho que los océanos tendrían raíces menos profundas que la tierra, y que la corteza oceánica se iría haciendo más delgada conforme se alejara de la costa. Lo que encontraron, en vez de esta transición gradual, fue un contraste notablemente abrupto de grueso a delgado. A diferencia de las decenas de kilómetros de rocas de corteza que se encuentran bajo los continentes, la corteza oceánica sólo medía unos ocho a diez kilómetros de espesor: la transición ocu-

rría drásticamente justo en la caída al borde de la plataforma continental. Esta delgada frontera entre los continentes y los océanos contradecía los modelos isostáticos.

Año tras año los científicos recorrieron ese ancho océano, de un lado a otro, cientos de veces. Cada cruce arrojó el mismo resultado: bajo las olas yacía una enorme cordillera que, con sus más de 30 mil kilómetros de largo, bisecaba con precisión el océano Atlántico. Las cimas ocultas de la dorsal mesoatlántica seguían las mismas anchas curvas de las costas de los continentes. Es más, si se consideraba que los bordes de los continentes se encontraban precisamente en las abruptas caídas hacia las llanuras abisales (y no en las costas arenosas), entonces la correspondencia entre los continentes resultaba asombrosa, como si fueran dos platos de porcelana que habían vuelto a juntarse a la perfección. La ciencia ya no podía tachar la semejanza entre las costas de mera coincidencia.

A medida que los científicos completaron nuevos cruces por el Atlántico y compararon más detalles comenzaron a emerger otros patrones. La dorsal mesoatlántica no era una cordillera cualquiera. En tierra, en la mayor parte de las cadenas montañosas los picos más altos están alineados a lo largo de su eje, pero justo en el centro de la dorsal mesoatlántica hay una gran depresión de unos treinta kilómetros de ancho y dos kilómetros más profunda que los picos adyacentes a este y oeste, una formación que hoy llamamos una fosa tectónica. Además, la dorsal y su fosa tectónica no trazaban una curva suave y continua de norte a sur; por el contrario, la fosa tectónica siempre estaba desplazada ciento cincuenta o más kilómetros hacia el este o el oeste por una falla de transformación muy claramente definida; estas fallas son lugares donde la corteza está rota y desplazada, lo que le da a toda la dorsal un aspecto escarpado y abrupto. ¿Qué estaba pasando?

Estos interesantes descubrimientos muy bien podrían haberse quedado sepultados bajo la avalancha de brillantes descubrimientos científicos en la posguerra; en cierto sentido no eran más que nuevos datos. Pero los investigadores principales del proyecto del fondo oceánico tenían talento para la publicidad. Bruce Heezen y Marie Tharp, geofísicos marinos del Observatorio Geológico Lamont de la Universidad de Columbia, desarrollaron un nuevo y dramático mapa topográfico de la superficie de la Tierra. Como en otros mapas topográficos representaron las elevaciones continentales con colores: las elevaciones más altas se representaban con verdes, amarillos y cafés y, finalmente, blancos en las mayores elevaciones, los picos nevados. En este mapa se destacaban claramente las grandes cadenas montañosas: los Himalayas, los Andes, los Alpes. Pero la novedad de Heezen y Tharp fue mostrar las inmensas cordilleras submarinas exactamente del mismo modo, si bien en diferentes tonos y matices de azul, una técnica que logró que la dorsal mesoatlántica y otros rasgos oceánicos revelaran su monumental tamaño en una escala global. Al centrar este exquisito mapa justamente sobre el Atlántico subrayaron en forma inolvidable las formas idénticas de la dorsal y las costas de los continentes a ambos lados. Para la década de 1960 el mapa de Heezen y Tharp se había convertido en un icono. Fuera cual fuera la causa de este paralelismo el hecho es que existía algún vínculo genético entre todos estos rasgos.

(Esta historia de Bruce Heezen [se pronuncia «Heizen»] y su ampliamente reconocida contribución tiene un significado especial para mí y para mi carrera, porque cuando llegué al MIT, en el otoño de 1966 me sorprendió encontrar que hasta los profesores más venerables del departamento de geología me trataban con gran respeto y estaban ansiosos por darme la

mano. Los pedigrís distinguidos —hasta los de la variedad de una homonimia errónea— tienen sus ventajas en ciencia).

El mar se expande

Con el descubrimiento de la dorsal mesoatlántica y de dorsales volcánicas similares bajo el océano Pacífico oriental y el océano Índico los científicos se lanzaron con bríos renovados a considerar la posibilidad de los movimientos continentales laterales. Al parecer los continentes no vagaban sin rumbo, como podría sugerir el término acuñado por Wegener, así que los geólogos comenzaron a buscar alguna fuerza oculta que pudiera reacomodar dramáticamente la superficie terrestre.

Un descubrimiento siguió a otro, y llegaron nuevos datos que no hicieron más que frustrar a los expertos. En 1956, Heezen y su jefe en Lamont, el sismólogo Maurice Ewing, documentaron una notable correspondencia entre la posición de la fosa tectónica en la dorsal mesoatlántica y un patrón de 54 mil kilómetros de largo de terremotos moderados en el suelo oceánico que se extendía alrededor del globo. Las fosas tectónicas y los terremotos estaban relacionados de algún modo, así que las dorsales debían ser lugares dinámicos y cambiantes.

Las rocas del suelo oceánico también sorprendieron a muchos geólogos que habían predicho que la dorsal mesoatlántica era una cordillera típica cubierta por una dura capa de roca caliza, justo como las Rocosas canadienses. Pero los extensos dragados a lo largo de la dorsal, así como observaciones de las muchas islas del Atlántico, no revelaron más que basalto, y uno relativamente joven, por cierto. Resulta que, excepto por una delgada capa de sedimentos suaves, la corteza oceánica es-

tá hecha casi por completo de basalto volcánico. Del este al oeste, a lo largo de más de cuatro mil kilómetros de suelo oceánico, el pavimento está hecho de puro basalto.

De hecho las dataciones hechas con base en las tasas constantes de decaimiento de elementos radiactivos revelan un simple patrón de edad en todas estas rocas. El basalto que se obtuvo de la fosa tectónica en el centro de la dorsal mesoatlántica está recién hecho, con menos de un millón de años de edad. Conforme más te alejas de la fosa tectónica, hacia el este o hacia el oeste, más viejo es el basalto, hasta que las rocas cerca de los márgenes continentales tienen más de cien millones de años de antigüedad. ¿Por qué son más jóvenes las rocas en medio del océano mientras que las de la periferia son mucho más viejas? Una conclusión lógica es que la dorsal mesoatlántica es una fila de volcanes que escupen constantemente nueva corteza basáltica. Pero ¿de dónde vienen las rocas mucho más antiguas en las orillas de las cuencas oceánicas?

La segunda tecnología antisubmarinos, llamada el magnetómetro, fue la que contribuyó con la información clave de la tectónica de placas. Los submarinos de la segunda guerra mundial son básicamente trozos enormes de aleaciones ricas en hierro, así que son magnéticos. Gracias al desarrollo de los magnetómetros los aviones cazadores de submarinos podían volar sobre la superficie del océano y detectar las anomalías magnéticas de un submarino enemigo cercano. Tras el conflicto los geofísicos inventaron nuevas clases de magnetómetros sensibles a cambios más pequeños en el campo magnético y adaptaron estos instrumentos para remolcarlos tras los barcos de investigación, justo sobre el fondo del mar.

Su objetivo era el basalto del suelo oceánico, que tiene una señal magnética débil en forma de diminutos cristales del mineral de hierro magnetita. Se sabe que el campo magnético de

la Tierra cambia ligeramente de un año al otro, lo que se llaman variaciones seculares. Cuando se enfría el magma de basalto estos cristales se quedan congelados en dirección del campo magnético de la Tierra, como diminutas agujas de compás. Así, el basalto del fondo oceánico conserva la orientación del campo magnético de la Tierra en el momento exacto en el que la roca se endureció. La próspera disciplina del paleomagnetismo estudia estos campos magnéticos invisibles que están encerrados en el basalto y en otras rocas. (En tierra firme un revoltijo de señales magnéticas producidas por el doblamiento del terreno, la creación de fallas y otras contorsiones de la corteza continental a lo largo del tiempo provoca que estos patrones se confundan).

A principios de la década de 1950 los oceanógrafos ubicaron magnetómetros cerca del suelo marino y recorrieron con ellos grandes trayectos a través de las dorsales oceánicas. Esperaban que sus mediciones paleomagnéticas arrojaran una imagen más clara de la variación secular en el fondo oceánico. Pero lo que encontraron fue, por el contrario, un patrón magnético muy extraño, sorprendentemente regular y complicado. Cerca de la fosa tectónica central, tanto del lado del Atlántico como del Pacífico, el basalto mostraba la orientación magnética normal y apuntaba fielmente hacia el polo magnético boreal. Pero varios kilómetros hacia el este o el oeste de la fosa tectónica la señal magnética hace un giro de 180 grados: el norte magnético se encuentra casi exactamente opuesto a su posición actual, donde debería estar el polo sur, y viceversa. Si navegas varios kilómetros más en cualquier dirección el campo magnético gira nuevamente 180 grados para volver a la orientación correcta. Se puede observar cómo el campo magnético congelado en las rocas da la vuelta una y otra vez, docenas de veces, en cualquier trayecto que se estudie.

Un análisis adicional reveló tres hechos clave. El primero es que las rocas con campos magnéticos revertidos forman franjas delgadas que corren de norte a sur, paralelas a las dorsales del océano Atlántico y Pacífico. Donde se rompe la fosa tectónica central, desplazada por las fallas de transformación, también se rompen las franjas magnéticas. El segundo hecho es que los patrones de estas franjas magnéticas son simétricos respecto a los ejes de la dorsal: si viajas hacia el este o hacia el oeste desde el centro verás exactamente la misma secuencia de franjas normales y revertidas, algunas más anchas y otras más delgadas. Y el tercero es que la datación radiométrica de estos basaltos de los sistemas de dorsales en todo el mundo confirma que cada reversión ocurrió en forma simultánea y durante una época breve y bien definida. Así, las reversiones magnéticas sirven como una especie de línea del tiempo del fondo oceánico.

A esto le siguieron dos conclusiones lógicas, si bien muy sorprendentes. La primera es que el campo magnético terrestre es enormemente variable: cada medio millón de años, en promedio, da un giro de 180 grados, y lo ha venido haciendo así al menos durante los últimos ciento cincuenta millones de años. Las razones de estos curiosos giros se entienden más o menos bien. Nuestro planeta es un enorme electroimán; su campo magnético es generado por remolinos de corrientes eléctricas que existen en el fluido que se mueve por convección en el manto externo de la Tierra. El calor es el motor de esta convección; en la frontera con el núcleo interior el líquido caliente y denso se expande y sube, y es remplazado por uno más frío y denso que se hunde. Los geofísicos usan sofisticados modelos de computadora para mostrar que la rotación de la Tierra añade algunos giros complicados y caóticos a la convección; estos movimientos provocan inversiones del campo mag-

nético cada medio millón de años, más o menos. La rotación de la Tierra también obliga a los polos magnéticos a que pasen la mayor parte del tiempo alineados cerca del eje de rotación estable, pero durante los periodos de inestabilidad del núcleo el campo magnético puede fluctuar enormemente y dar una voltereta, tal vez en el transcurso de un siglo o incluso menos.

La segunda conclusión es que las dorsales mesoceánicas producen una nueva corteza de basalto a un ritmo de uno o dos centímetros al año. El basalto viejo se desplaza hacia los lados, tanto hacia el este como al oeste, conforme la lava nueva toma su lugar. Los sistemas de dorsales son, pues, dos grandes cintas transportadoras que corren en sentidos opuestos y exponen continuamente nuevo fondo oceánico. El basalto nuevo que se genera en la dorsal mesoatlántica expande el Atlántico, que puede crecer hasta cinco centímetros cada año; en promedio cada nuevo kilómetro de suelo oceánico tarda unos 20 mil años en emerger. Si reproducimos la película en reversa unos ciento cincuenta millones de años, nos encontraremos con que el océano Atlántico no existía. Antes de esa época América debe haber estado unida a Europa y África, tal como propuso Alfred Wegener.

Una de las presentaciones más influyentes de este notable descubrimiento apareció en 1961 en el *Geological Society of America Bulletin*. El geofísico británico Ronald Mason y el experto estadounidense en electrónica Arthur Raff, del Instituto Scripps de Oceanografía en California, trabajaron juntos durante casi una década para reunir una gran cantidad de estudios magnéticos exhaustivos del suelo oceánico cerca de la costa oeste de América del Norte. El plato fuerte de su artículo fue un mapa magnético detallado de la dorsal de Juan de Fuca, una gran formación que se encuentra en el suelo del

océano Pacífico, a sólo un día de navegación de los puertos de Oregon, el estado de Washington y la Columbia Británica.

El mapa de Mason y Raff, de una austeridad monocromática —las franjas blancas y negras representan campos magnéticos normales e invertidos, respectivamente—, muestra docenas de franjas que se extienden de norte a sur. En grandes zonas de la corteza del océano, cada una de cientos de kilómetros de ancho, prevalece la uniformidad: cada una muestra un patrón de franjas simétrico respecto a una fosa tectónica central. Pero entre cada bloque adyacente el patrón se encuentra roto, desplazado a lo largo de líneas trazadas por las fallas de transformación y torcido como un cuadro cubista. El análisis de los desplazamientos a lo largo de estas fallas, la zona de fractura Mendocino, revela un notable desplazamiento lateral de 1100 kilómetros de largo. En el interior de la corteza terrestre deben existir procesos extraordinariamente poderosos, capaces de transformarla tan dramáticamente.

Como comenzaban a acumularse evidencias parecidas a lo largo de los sistemas de dorsales de todo el mundo, los geólogos, los geofísicos y los oceanógrafos empezaron a colaborar en un nuevo esfuerzo común. Todo apuntaba a la misma conclusión: las correlaciones de la topografía del fondo oceánico, la sismología, el magnetismo y la edad de las rocas. La corteza terrestre se crea en todo el mundo en los sistemas de dorsales, dinámicas zonas de actividad volcánica. La velocidad a la que se extiende el fondo oceánico ha quedado registrada en forma de patrones simétricos de franjas magnéticas y en la edad de los basaltos.

Pronto una cascada de artículos importantes transformaron la mentalidad geológica colectiva, y para mediados de la década de 1960 casi todos estaban convencidos de lo que alguna vez se había considerado herético: los continentes se mueven.

El océano Atlántico se ha ido ensanchando, año con año, durante más de cien millones de años.

El caso de la corteza desaparecida

Los primeros años de la revolución de la tectónica de placas fueron una época frenética de descubrimientos, cambios de paradigmas y nuevas preguntas igual de intrigantes. Una de estas preguntas sin responder destacó entre las demás: ¿cómo es posible que cada 20 mil años se agregue una nueva franja de corteza basáltica de un kilómetro de ancho a casi 50 mil kilómetros de dorsales mesoceánicas en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico? ¿Cómo puede caber toda esta nueva corteza? A menos que la Tierra se esté haciendo más grande —y durante un breve interludio en las décadas de 1950 y 1960 un grupo de geólogos, pequeño pero muy activo, en el que se encontraba Bruce Heezen, defendió el escenario insostenible de que la Tierra en efecto se expandía— la corteza tiene que ir a *algún lado*.

Los sismólogos encontraron la respuesta. En el clima de la guerra fría de la década de 1960 las armas nucleares se convirtieron en el tema central de la sismología (y en su fuente primordial de financiamiento). Tras la crisis de los misiles con Cuba en 1962, Estados Unidos y la Unión Soviética acordaron un Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares, que restringió las pruebas de armas nucleares a las detonaciones subterráneas. El cumplimiento del Tratado exigía un monitoreo sísmico continuo mediante un extenso (léase caro) arreglo de instrumentos sensibles a la vibración que se instalaron incluso en las zonas más lejanas del globo. El resultado fue la Red Sismográfica Estandarizada Mundial (WWSSN, por

sus siglas en inglés), que conectaba ciento veinte estaciones a una central de procesamiento computarizada en Golden, Colorado, hogar de una de las ramas de la United States Geological Survey. Por primera vez en la historia fue posible conocer con exactitud las ubicaciones, profundidades, magnitudes y movimientos de pequeños temblores (y grandes explosiones) en cualquier lugar del globo.

Las ciencias de la Tierra cosecharon un enorme beneficio adicional. Armados con sus nuevas herramientas, los geofísicos pudieron detectar miles de movimientos terrestres hasta entonces invisibles, y así documentaron patrones sísmicos globales antes desconocidos. Encontraron que casi todos los movimientos súbitos en la corteza terrestre tienen lugar a lo largo de delgadas líneas de actividad sísmica intensa, lugares como las dorsales mesoceánicas. Muchos otros terremotos ocurren cerca de cadenas de volcanes próximas a los márgenes de los continentes, por ejemplo alrededor del famoso «Cinturón de Fuego» del Pacífico. Estas violentas regiones de la costa del Pacífico, que incluyen Filipinas, Japón, Alaska, Chile y otras zonas de peligro, formaban un patrón común.

Se sabía desde hacía tiempo que los terremotos relativamente superficiales (los que ocurren a profundidades de unos cuantos kilómetros o menos) se originan cerca de las costas, en los alrededores de las fosas del fondo oceánico, mientras que los terremotos más profundos ocurren tierra adentro y lejos de la costa. Los terremotos más profundos que se conocen suelen tener lugar bajo cadenas de volcanes muy explosivos y peligrosos, como el monte Santa Helena y el monte Rainier en el estado de Washington, que suelen encontrarse a una distancia considerable tierra adentro.

Hacia finales de la década de 1960 el WWSSN arrojó nuevos datos que ayudaron a entender los detalles de la relación entre

las fosas marinas profundas, los terremotos y los volcanes. El patrón característico de terremotos profundos tierra adentro, lejos de las fosas, ayudó a construir una imagen de enormes losas de corteza oceánica que se hunden en el manto, bajo los continentes, a lo largo de lo que se llamó zonas de subducción. La Tierra se traga, literalmente, la vieja corteza basáltica, mucho más fría y densa que el manto caliente. Conforme el basalto en subducción atrapa y arrastra en su camino fragmentos de la corteza adyacente se forman las profundas fosas oceánicas. Por cada kilómetro cuadrado de corteza nueva que se forma en las dorsales oceánicas desaparece un kilómetro cuadrado de corteza vieja en la zona de subducción. La nueva compensa con exactitud la vieja.

La nueva ciencia de la tectónica de placas finalmente adquirió claridad, como si se hubiera levantado un velo. Las dorsales oceánicas y las zonas de subducción definen las fronteras de una docena de placas en movimiento, cada una de las cuales es fría (comparada con el manto que hay más abajo), quebradiza (de aquí la fractura de los terremotos) y de apenas unas cuantas decenas de kilómetros de espesor pero de cientos de miles de kilómetros de ancho. Estas placas rígidas simplemente se deslizan sobre las rocas del manto, más calientes y blandas. El Cinturón de Fuego del Pacífico delimita una de las grandes placas, y la Antártida y los mares que la rodean marcan las fronteras de otra. Las placas de América del Norte y del Sur se extienden hacia el oeste desde la dorsal mesoatlántica y hasta la costa del Pacífico de América, mientras la placa Eurasiática se extiende hacia el este desde la dorsal mesoatlántica hasta la costa del Pacífico del este de Asia. La placa de África, que se extiende desde la dorsal mesoatlántica en el oeste hasta la mitad del océano Índico en el este, muestra un aspecto intrigante de la dinámica superficie de la Tierra: el

continente africano está comenzando a desprenderse, pues continuamente se forman nuevas fosas tectónicas, marcadas por una cadena de lagos y de volcanes activos, así como regiones altas que por cierto son el hogar de algunos de los corredores de fondo más rápidos del mundo. Algún día África se dividirá en dos placas entre las que crecerá un nuevo océano.

Conforme las dorsales oceánicas producen nuevo material para las placas y las zonas de subducción devoran el viejo, Euclides vuelve a entrar en escena para complicar el escenario: la Tierra es una esfera. La geometría del nacimiento y subducción de las placas sobre una esfera requiere que algunas de las placas rocen con otras a lo largo de fallas de transformación con bordes irregulares, y esto explica las bandas desplazadas que Mason y Raff mostraron en su famoso mapa magnético de la dorsal de Juan de Fuca. La violenta falla de San Andrés, que ha ocasionado muchos terremotos memorables en California, es otra de estas suturas. Todos los días se acumula más tensión a lo largo de la falla, pues la gran placa de América del Norte se mueve hacia el sur en relación con la gran placa del Pacífico. Todos los días estos inexorables movimientos de las placas acercan más a los habitantes de Los Ángeles y San Francisco al próximo «gran terremoto».

Esto es básicamente todo lo que hay que saber sobre la sencilla geometría de la tectónica de placas. Pero ¿qué pasa con las descomunales fuerzas que provocan el movimiento de las placas? ¿Qué puede hacer que continentes enteros se muevan, rocen y choquen entre sí a lo largo de cientos de millones de años? La respuesta se encuentra en el calor interno de la Tierra. La Tierra es caliente y el espacio es frío. La segunda ley de la termodinámica, un concepto fundamental en todo el cosmos, dice que el calor siempre fluye de los objetos más ca-

lientes a los más fríos. Así, el calor debe dispersarse poco a poco, y encontrar alguna forma de alcanzar el equilibrio.

Recuerda los tres mecanismos familiares que permiten la transferencia de energía calorífica. Todos los objetos calientes transfieren su calor a sus alrededores en forma de *radiación* infrarroja; el calor también se mueve, si bien en forma mucho menos eficiente, por contacto directo o *conducción*, y por *convección*, cuando un fluido se mueve entre regiones más frías y más calientes. La Tierra tiene que obedecer la segunda ley de la termodinámica. Pero ¿cómo puede moverse con eficiencia el calor entre el núcleo ardiente y la corteza fría? La roca y el magma impiden la radiación infrarroja, y la conducción es muy lenta y no mucho más eficiente. Así que la clave es la convección de las rocas del manto, ablandadas por el calor hasta alcanzar la consistencia del caramelo blando.

Las rocas de la superficie de la Tierra son materiales duros y quebradizos, pero muy adentro de la olla de presión sobrecalentada que es el manto las rocas se hacen tan blandas como si fueran de mantequilla. A lo largo de millones de años, y sometidas a las presiones del interior profundo de la Tierra, las rocas se deforman, rezuman y fluyen. La rocas más calientes y con mayor flotabilidad suben gradualmente hacia la superficie, mientras que las rocas más frías y densas se hunden en las profundidades. Existen grandes celdas de convección, cada una de miles de kilómetros de ancho y cientos de kilómetros de profundidad, que hacen girar el manto terrestre en un majestuoso ciclo invisible. El ritmo al que ocurre esta gran revoltura planetaria es igualmente grande: un solo giro de la celda de convección puede tomar cien millones de años en completarse, o más.

Al principio, tal vez durante más de mil millones de años, la convección del manto bajo la uniforme corteza de basalto

que cubría la Tierra debe haber sido una caótica mescolanza. Aquí y allá las burbujas de granito de menor densidad se elevaban en pulsos y columnas desorganizadas hacia la superficie, donde se acumulaban y quebraban el basalto más frío y denso. Algunos fragmentos aislados y densos de esa corteza fría se hundían lentamente hacia el interior, en un intercambio de calor de escala global.

Durante los siguientes quinientos millones de años, el reciclado del manto se volvió más organizado. Se consolidaron docenas de celdas de convección más pequeñas, cada una con columnas y láminas de magma en ascenso y bloques de corteza que se hundían en las profundidades; un puñado de ciclos majestuosos, cada uno de varios kilómetros de profundidad y miles de kilómetros de extensión. La nueva corteza basáltica se formaba en el punto en el que las celdas de convección se elevaban hacia el fondo oceánico, a lo largo de las dorsales en crecimiento, y la vieja y fría corteza basáltica se hundía en el manto en un ángulo muy pronunciado para formar la zonas de subducción, en una Tierra cada vez más dominada por los nuevos procesos de la tectónica de placas. En un corte transversal las turbulentas capas exteriores de la Tierra se habrían visto como una colección de remolinos verticales que daban un giro completo cada cien millones de años o más.

Entonces, como ahora, la superficie de la Tierra, en constante evolución, era un reflejo de los procesos de enorme escala que ocurrían en las profundidades. Sobre las zonas de convección a través de las que subía el magma crecieron grandes cadenas de volcanes basálticos. Se formaron fosas muy abruptas en los puntos en los que la vieja corteza de subducción se hundía en el manto y plegaba y arrastraba consigo el fondo oceánico adyacente. La subducción también aceleró la siempre importante producción de granito. Conforme la corteza de

subducción de basalto frío y húmedo se hundía más y más profundamente, devorada nuevamente por el interior de la Tierra, se calentaba y comenzaba a fundirse, no del todo pero tal vez sí un 20 o un 30 por ciento. Estos crecientes volúmenes de magma granítico volvieron a emerger a la superficie y formaron cadenas de islas volcánicas grises de cientos de metros de largo. Todo estaba listo para comenzar a construir los continentes.

La revolución

El granito flota, el basalto se hunde: ésa es la clave del origen de los continentes. Los magmas de composición granítica son mucho menos densos que su roca madre, el basalto, así que es inevitable que suban, para cristalizarse en forma de masas de roca cercanas a la superficie, o que hagan erupción a través de volcanes que arrojan capas de cenizas sobre la superficie. A lo largo de los miles de millones de años de historia de la Tierra este proceso continuo ha dado origen a incontables islas de granito.

La tectónica de placas no sólo produjo estas cadenas de islas con raíces de granito; también las congregó en forma de continentes. La clave reside en el simple hecho de que el granito no puede subducirse. El basalto denso sobre el cual flota se hunde fácilmente en el manto, pero el granito es como un corcho que flota. Una vez que se forma, se conserva en la superficie. Conforme la subducción produce más islas, el área total de granito crece en forma irreversible.

Imagínate una placa en subducción bajo la corteza oceánica, salpicada de islas de granito que no pueden hundirse. El basalto se subduce, pero las islas no. Deben permanecer en la su-

perficie y formar una franja de tierra justo sobre la zona de subducción. A lo largo de decenas de millones de años se apilan más y más islas de granito y la franja se hace más y más ancha, conforme nuevos volúmenes de magmas graníticos se elevan de la losa en subducción para engrosar y expandir aún más el continente. Las islas se amalgaman para formar protocontinentes, que a su vez se suman para formar continentes, del mismo modo que las condritas de nuestro sistema solar alguna vez se amalgamaron para formar planetésimos y los planetésimos para formar planetas.

El ciclo épico de la tectónica de placas transforma nuestro mundo. La superficie de la Tierra, delgada, fría y quebradiza, se rompe y se mueve como la espuma en una olla de sopa que hierve. La nueva corteza emerge de las dorsales volcánicas, que revelan las zonas en las que emergen las profundas celdas de convección. La vieja corteza es devorada en las zonas de subducción, que revelan los puntos en los que descienden las celdas de convección. Las alteraciones más violentas de la superficie de la Tierra —los peores terremotos, los volcanes más grandes— no son más que incidentes insignificantes, pestañeos, comparados con los poderosos movimientos de escala global que ocurren en sus profundidades.

La tectónica de placas también revolucionó las ciencias de la Tierra. En épocas anteriores, en la edad de las tinieblas de la tectónica vertical, cada disciplina geológica se estudiaba por separado y no parecía guardar ninguna relación con las demás. Antes de la revolución los paleontólogos no tenían ninguna necesidad de hablar con los oceanógrafos; el estudio de los volcanes tenía poco que ver con la geología de yacimientos; a los geofísicos no les interesaba el origen de la vida ni la evolución, y las rocas que existían en un país no parecían tener nin-

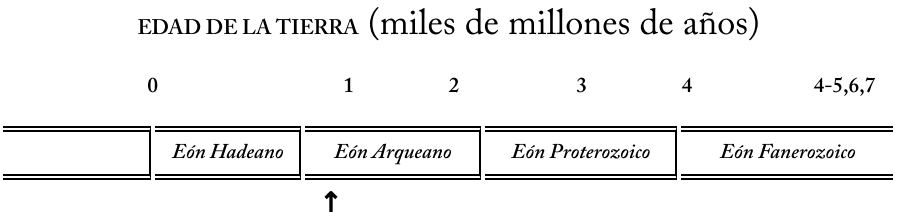
guna relevancia en relación con las rocas de otro, y mucho menos con las rocas del lejano fondo oceánico.

La tectónica de placas unificó todo lo que tenía que ver con la Tierra. Ahora podemos relacionar con gran precisión los organismos fósiles que existen a lo largo de anchos océanos. Los terrenos volcánicos extintos conducen a los mineros hacia yacimientos muy valiosos ocultos en sus zonas de subducción correspondientes, solidificadas desde hace millones de años dentro de la roca continental. Los estudios geofísicos de los continentes en movimiento exponen algunas influencias clave en la evolución de las plantas y los animales. La tectónica de placas revela a la Tierra como un sistema planetario integrado, desde la corteza hasta el núcleo, y a escalas que van desde la nanométrica hasta la global, con un solo principio unificador a lo largo del tiempo y del espacio.

Tomó un tiempo que la producción de granito pasara de ser un mosaico desordenado de islas formadas por columnas de magma y dominado por la tectónica vertical a un conjunto ordenado de continentes formados por procesos de subducción. Para cuando la Tierra cumplió 1500 millones de años el manto de convección —esa zona de 2800 kilómetros de espesor que contiene casi toda la masa y la energía térmica de la tierra — había transformado irrevocablemente la superficie de nuestro planeta. A diferencia del basalto negro, las masas crecientes de granito desnudo tenían un color blanco grisáceo, el color típico de las mezclas de cuarzo y feldespato. Así que si viajaras en el tiempo a ese antiguo mundo, hace tres mil millones de años, te encontrarías algunos paisajes conocidos. Podrías caminar por los protocontinentes, carentes de toda vegetación, cubiertos por colinas escarpadas y valles profundos, no muy diferentes a ciertas zonas costeras del Ártico. Te tocarían algunos periodos de clima violento, puntuados por días de cielos

azules y soleados y nubecitas blancas. Encontrarías un océano saturado de minerales disueltos, entre ellos carbonatos de calcio y de magnesio que ocasionalmente se depositarían como capas de cristales sobre el fondo oceánico de basalto. Podrías sentarte en las primeras playas de arenas blancas, ricas en duros granos de cuarzo que se erosionaron del granito gris, a contemplar el mar azul. Pero pronto te asfixiarías en la densa atmósfera, rica en nitrógeno y dióxido de carbono pero sin el más remoto olorcillo de oxígeno vital.

La invención de los continentes —masas de tierra formadas a partir de una gruesa corteza de granito— no es más que un acto secundario en el gran desfile de la evolución de la Tierra. Las superficies de granito, formadas a partir del calentamiento del basalto en las profundidades y de su fundición parcial en la superficie, y que cubrían casi toda la tierra, parecían costras cada vez más grandes en la prístina superficie negra de nuestro planeta. Poco a poco las gruesas losas de granito, que flotaban sobre una base de basalto denso, se elevaron sobre el nivel del mar y sentaron las bases de todos los grandes continentes, lo que hoy, desde nuestra perspectiva antropocéntrica, percibimos como la Tierra sólida.



Capítulo 6

La Tierra viva

Los orígenes de la vida

Edad de la Tierra: de 500 millones a 1000 millones de años

A sus 500 millones de años de edad la Tierra, apenas una niña, todavía no daba ninguna pista de lo precoz que estaba a punto de volverse. La Tierra podía hacer alarde de su dramático vulcanismo, sin duda, pero también otros planetas y lunas de nuestro sistema solar. La Tierra estaba agraciada por océanos que cubrían toda su superficie, pero también Marte por esos días, y Europa y Calisto, las gigantescas lunas de Júpiter, estaban envueltas en océanos cubiertos de hielo de más de ochenta kilómetros de profundidad, de modo que contenían una proporción mucho mayor del precioso líquido en la superficie. La tectónica de placas contribuyó a transformar nuestro planeta, pero en esos primeros años Venus y tal vez también Marte tenían sus propios fenómenos tectónicos impulsados por convección.

Ni siquiera la química terrestre distinguía nuestro planeta de los demás. El basalto y el granito fueron las piedras fundacionales de todos los planetas rocosos. Todos estaban compuestos básicamente por oxígeno, silicio, aluminio, magnesio,

calcio y hierro. La Tierra tenía su reserva de carbono, nitrógeno y azufre, pero en nuestro sistema solar también había otros mundos dotados de esos elementos vitales. En casi cada aspecto la Tierra de hace cuatro mil millones de años parecía un planeta bastante corriente.

Pero la Tierra estaba a punto de volverse única entre los mundos que conocemos. Es verdad que a sus quinientos millones de años ya era un lugar único, porque ningún otro planeta o luna había soportado episodios tan extensos de cambio; ningún otro planeta había cambiado su aspecto externo en forma tan radical y frecuente. Pero estas metamorfosis sólo eran diferentes en escala, y no en clase. El motor más dinámico del cambio planetario —el que distingue a la Tierra de todos los demás— aún no emergía. Sólo la Tierra cobró vida. El origen y la evolución de la biosfera distingue a la Tierra de todos los otros planetas y lunas conocidos.

¿Qué es la vida?

¿Qué significa estar vivo? ¿Qué es este fenómeno que hace a la Tierra tan diferente del resto del universo conocido? Podemos tratar de describir la vida como un conjunto de rasgos entrecruzados: una estructura compleja, aparejada con la capacidad de moverse, crecer, adaptarse y reproducirse. Podemos señalar algunos atributos celulares tan característicos como la membrana o las grandes hebras de la molécula genética ADN. Pero no importa qué tan larga sea nuestra lista de rasgos diagnósticos, siempre parece haber algunas excepciones. Los líquenes no se mueven. Las mulas no se reproducen.

La química ofrece fundamentos más firmes para definir qué es la vida, pues todos los seres vivos son sistemas moleculares organizados que experimentan reacciones químicas de una complejidad y una coordinación asombrosas. Todas las formas de vida están compuestas por conjuntos discretos de moléculas (células) separados del exterior (el medio ambiente) por una barrera molecular. Estas astutas colecciones de sustancias químicas han desarrollado dos formas interdependientes de autopreservación —el metabolismo y la genética— que juntas permiten distinguir inequívocamente lo vivo de lo no vivo.

El metabolismo es un conjunto diverso de reacciones químicas que todas las formas de vida usan para convertir átomos y energía de su entorno en materiales para sus células. Las células, diminutas fábricas químicas, absorben materias primas moleculares y combustible y usan esos recursos, obtenidos con gran esfuerzo, para moverse, repararse, crecer y, de vez en cuando, reproducirse. E igual que las fábricas químicas, y a diferencia de los incendios forestales o las reacciones nucleares en cadena que existieron dentro de la primera estrella generadora de elementos, las células controlan y regulan estas reacciones con exquisita precisión mediante retroalimentaciones tanto positivas como negativas.

Pero el metabolismo no basta, por sí mismo, para definir la vida. A diferencia de su medio ambiente inerte, las células contienen información en forma de moléculas de ADN, y pueden copiar y pasar esta información molecular de una generación a la otra. Es más, la información puede mutar; con frecuencia las moléculas se copian con errores, lo cual produce variaciones genéticas. Así, las mutaciones son la fuente de novedades químicas, inventos que le permiten a la población de células competir contra otras poblaciones menos eficientes pa-

ra sobrevivir durante épocas de cambio ambiental, o para expandir su presencia en nuevos nichos ambientales.

De este modo, tanto el metabolismo como la genética deben caracterizar la materia viva, pero resulta sorprendente que los biólogos no hayan sido capaces hasta ahora de concebir una definición única y universalmente aceptada de vida. El Programa de Exobiología de la NASA, que tiene el encargo de investigar los orígenes de la vida y la posibilidad de que exista en otros planetas, es tal vez el que se ha acercado más a esta definición. En 1994 un panel de la NASA presidido por Gerald Joyce, del Instituto Scripps, se decidió por una sencilla frase: «La vida es un sistema químico autosustentable capaz de experimentar evolución darwiniana».

Joyce, quien lidera los esfuerzos por construir vida en el laboratorio (trabaja en un campo de investigación más bien futurista, llamado biología sintética), consiguió hace poco un logro extraordinario en el campo: desarrolló un conjunto de miles de moléculas distintas que interactúan entre sí para formar, dentro de un tubo de ensayo, una comunidad autosustentable y en evolución. Este intrincado proceso, que ocurre entre las paredes de un recipiente de cristal, ocasiona que con el tiempo cambien las proporciones de diversas moléculas que estaban presentes en el inicio del experimento, si bien las moléculas mismas son copias exactas de las originales. Joyce se dio cuenta de que un sistema químico que no hace más que producir duplicados *ad nauseam*, incluso si las proporciones relativas de esas moléculas cambian con el tiempo, no es mucho más que una fotocopiadora molecular. Los sistemas vivientes naturales, por el contrario, tienen la habilidad de mutar, y al hacerlo adquirir capacidades completamente nuevas, como explorar nuevos medios ambientes, sobrevivir cambios ambientales inesperados, desempeñar nuevas tareas y ganarle a los vecinos en la

competencia por los recursos. Así que Joyce revisó su definición e incluyó una característica más: «La vida es un sistema químico autosustentable capaz de incorporar *novedades* y de experimentar evolución darwiniana». Me parece que lo más notable de este cambio fue que al darse cuenta de lo sutil que es la vida Jerry Joyce haya tenido la modestia de cambiar la definición de la NASA, en vez de arrogarse el puesto, histórico aunque frankensteiniano, de ser el primer científico que creó vida en el laboratorio.

Materia prima

¿Cómo le hizo el planeta Tierra, inerte hasta entonces, para inventar el metabolismo y la genética? Casi todos los que estamos en este negocio del origen de la vida sospechamos que la aparición de la primera célula fue un proceso geoquímico inevitable. La Tierra poseía todas las materias primas esenciales. Los océanos, la atmósfera, las rocas y los minerales eran ricos en los elementos necesarios: carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, azufre y fósforo. También la energía era abundante: la radiación solar y el calor interno de la Tierra proveían las fuentes más fiables, pero pueden haber contribuido los relámpagos, la radiactividad, los impactos de meteoritos y muchas otras formas de energía. (Y por lo tanto, existen tantas teorías sobre el origen de la vida como fuentes de elementos y de energía hay).

Casi todo mundo concuerda en un aspecto: el carbono, el elemento más versátil de la tabla periódica, tuvo el papel protagónico. Ningún otro elemento puede formar diseños moleculares tan ricos o desempeñar funciones moleculares tan diversas. Los átomos de carbono poseen una habilidad iniguala-

ble para enlazarse a otros átomos de carbono, así como a miles de otros elementos —en particular el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno y el azufre— con hasta cuatro enlaces simultáneos. El carbono puede formar largas cadenas de átomos, o anillos entrelazados, o complejos arreglos que se ramifican, o casi cualquier otra forma imaginable. Es así que forma la columna vertebral de proteínas y carbohidratos, de grasas y aceites, del ADN y del ARN. Sólo las polifacéticas moléculas basadas en el carbono parecen compartir las características duales que definen la vida: la capacidad de replicarse y la capacidad de evolucionar.

Cada partícula de comida que ingerimos, cada medicina que tomamos, cada estructura de nuestro cuerpo y de los cuerpos de todos los demás seres vivos están cargados de carbono. En todos lados hay sustancias químicas basadas en el carbono: en pinturas, pegamentos y tintes, en plásticos, en las fibras de tu ropa y en las suelas de tus zapatos, en las páginas y la encuadernación y la tinta de este libro, y en combustibles ricos en energía, desde el carbón y el petróleo hasta el gas natural y la gasolina. Y, como veremos en el capítulo 11, nuestra dependencia, cada vez mayor, de combustibles basados en el carbono y en otras sustancias está implicada en algunos cambios preocupantes en el medio ambiente de la superficie de la Tierra que están ocurriendo a un ritmo tal vez inédito en millones de años.

Y sin embargo, el carbono no pudo producir por su cuenta la notable progresión de geoquímica a bioquímica. Todos los grandes poderes de transformación de la Tierra —el agua, el calor, los relámpagos y la energía química de las rocas— desempeñaron su papel en el origen de la vida.

Paso uno: ladrillos y cemento

Nadie sabe exactamente cómo (o cuándo) ocurrió la antigua transición de un mundo inerte a uno lleno de vida, pero gracias a la investigación especializada que se realiza en docenas de laboratorios alrededor del mundo están saliendo a la luz algunos principios básicos. La biogénesis debe haber ocurrido como una secuencia de pasos, cada uno de los cuales agregó un poco de complejidad química al mundo. Primero tuvieron que aparecer los bloques de construcción molecular. Luego esas pequeñas moléculas tuvieron que ser seleccionadas, concentradas y organizadas en las estructuras esenciales de la vida, como membranas, polímeros y otros componentes funcionales de la célula. En algún momento esta colección de moléculas tuvo que hacer copias de sí misma y desarrollar algún método para transmitir información genética de una generación a la otra. De lo demás se encargó la selección natural darwiniana: surgió la vida.

El primer paso de la biogénesis, y el mejor entendido de todos, fue la producción desenfrenada de los bloques de construcción molecular de la vida: azúcares, aminoácidos, lípidos y otros. Estas sustancias químicas esenciales, todas basadas en el carbono, ese elemento tan versátil, surgen siempre que la energía pueda interactuar con moléculas simples como el dióxido de carbono y el agua. La materia prima de la vida se formó allí donde los relámpagos perforaron la atmósfera, donde el calor volcánico hizo hervir las profundidades del mar, incluso donde la radiación ultravioleta bañó las nubes moleculares en las profundidades del espacio, mucho antes de que la Tierra naciera. En los antiguos mares de nuestro planeta comenzaron a concentrarse las sustancias de la vida, conforme

las biomoléculas caían de los cielos en forma de lluvia y emergían de las profundidades de la Tierra.

La investigación moderna sobre el origen de la vida comenzó en 1953, con el que sigue siendo hasta hoy el experimento más famoso en el campo de la biogénesis. El químico Harold Urey, profesor de la Universidad de Chicago y ganador del premio Nobel, y su decidido alumno Stanley Miller, diseñaron un sencillo y elegante aparato de vidrio para simular las condiciones de la Tierra antigua. El agua hirviendo hacía las veces del ardiente océano hadeico, una mezcla de gases simples imitaba la atmósfera primitiva de la Tierra y algunas chispas eléctricas simulaban los relámpagos. Después de unos cuantos días el agua, hasta entonces incolora, adquirió un tinte rosado y luego café, y se pobló de moléculas orgánicas. El vidrio transparente se llenó de un fango orgánico negro y pegajoso.

Los análisis químicos de rutina que realizó Miller revelaron una abundancia de aminoácidos y de otros bloques de construcción biológicos. Su artículo de 1953 en la revista *Science*, en el que anunció los resultados, produjo una ola de encabezados sensacionalistas alrededor del mundo. Los químicos se lanzaron en manada al estudio de la química prebiótica. Y aunque se cuestionó la combinación exacta de los gases atmosféricos en el experimento Miller-Urey, se han realizado miles de variaciones experimentales sobre el tema que han establecido, más allá de toda duda, que la Tierra primitiva debió haber estado repleta de las moléculas esenciales para la vida. El experimento de 1953 y sus descendientes fueron tan exitosos que muchos expertos pensaron que el misterio de los orígenes de la vida estaba básicamente resuelto.

Este entusiasmo inicial, y el continuo interés en el tema, pueden haber cobrado un precio. El magistral experimento de Miller determinó que la investigación sobre los orígenes de la

vida debía desarrollarse en el campo de la química orgánica, y estableció el paradigma de que la vida emergió a partir de un caldo primigenio, tal vez un «tibio estanque» (haciendo eco a las especulaciones que Darwin hizo para sí casi un siglo antes). En la década de 1950 pocos científicos experimentales se detuvieron a considerar la asombrosa complejidad de los ambientes geoquímicos naturales, alterados por los ciclos diarios de noche y día, calor y frío, humedad y secas, y muchas otras variables. Tampoco consideraron la gama de gradientes naturales, por ejemplo en temperatura, cuando el magma entra en contacto con la fría agua del océano, o en salinidad, cuando un arroyo de agua fresca penetra en el océano salado. Y ninguno de los experimentos de Miller incorporó rocas y minerales, tan químicamente diversos, con docenas de elementos dominantes y secundarios y con fases cristalinas energéticas y reactivas. Asumieron que la superficie de la Tierra, entibiada por la luz solar, era donde tendría que haber ocurrido toda la acción.

La influencia de Miller fue muy poderosa, y él y sus seguidores dominaron la comunidad de investigadores del origen de la vida durante más de tres décadas. A su artículo le siguieron cascadas de publicaciones; aparecieron nuevas revistas, se les concedieron honores y premios y el financiamiento estatal fluyó en dirección de los «milleritas». Pero a finales de la década de 1980 se descubrieron ecosistemas en los humeantes respiraderos volcánicos de los océanos, y esto dio origen a una alternativa viable para el «caldo primigenio». En esas zonas oscuras y profundas, alejadas de la iluminada superficie del océano, existen fluidos ricos en minerales que interactúan con la ardiente corteza volcánica para dar lugar a respiraderos parecidos a géiseres en el fondo oceánico. Estos respiraderos arrojan chorros de agua hirviendo que, al contacto con el agua helada del océano, crean una precipitación constante de mine-

rales (las partículas microscópicas que producen el «humo» negro). En estos lugares asombrosos y ocultos abunda la vida, alimentada por la energía química de la frontera entre la corteza y el océano.

La batalla entre diversos paradigmas sobre el origen de la vida revela muchas cosas sobre la sociología de la ciencia. Por un lado, el proceso Miller-Urey produjo un conjunto de biomoléculas sorprendentemente similar al que usan los seres vivos. La mezcla de aminoácidos, carbohidratos, lípidos y bases casi parece ser una dieta bien balanceada. Como se le ocurrió decir a Harold Urey: «Si Dios no lo hizo así, perdió una buena apuesta». Pero los devotos creyentes que se encontraban en la cancha de Miller hicieron algo más que apoyar la idea del caldo primigenio activado por la energía de los relámpagos: también tuvieron buen cuidado de rechazar públicamente todas las ideas que podían competir con la suya.

Pero la eficacia de la camarilla de La Jolla para obstruir nuevas ideas comenzó a menguar con el sorprendente descubrimiento de los negros respiraderos volcánicos que describo arriba, así como de la poderosa influencia de la NASA, que tenía sus propias ambiciones. El descubrimiento de microbios en los respiraderos volcánicos vino a confirmar que la vida puede prosperar en ambientes extremos, lugares en los que a la generación anterior de biólogos ni siquiera se le había ocurrido buscar. Hoy sabemos que hay microbios que prosperan en los arroyos ácidos que forman los desechos de las minas y en estanques hirvientes sobre algunas zonas volcánicas. Los microbios se las arreglan para ganarse la vida dentro de las heladas rocas antárticas, y sobreviven en partículas de polvo estratosférico, a muchos kilómetros sobre la superficie. Existen grandes ecosistemas microbianos bajo la superficie sólida de la Tierra, a kilómetros de profundidad, donde las células viven en las

más diminutas grietas y fisuras y subsisten a partir de la exigua energía química de los minerales y bien pueden conformar la mitad de la biomasa de la Tierra, lo mismo que todos los árboles y los elefantes y las hormigas y las personas combinadas. Si puede prosperar esta vida extremófila —si una fracción significativa de la vida en la Tierra sobrevive en ambientes profundos, protegidos de las agresiones de los asteroides y los cometas—, ¿no podría haberse originado allí?

La NASA, cuyas posibilidades de financiamiento científico están estrechamente vinculadas con la posibilidad de hacer grandes descubrimientos, saltó de alegría ante esta noticia. Si la vida está limitada a surgir en un escenario tipo Miller-Urey, en la superficie de un planeta acuático bañado por la luz solar, eso querría decir que la Tierra y tal vez Marte (en sus etapas tempranas, sus primeros quinientos millones de años) serían los únicos mundos a nuestro alcance en los que existiría la posibilidad de que surgiera la vida. Pero si la vida puede aparecer en las profundidades oscuras y calientes de una zona volcánica bajo la superficie, muchos otros cuerpos celestes se convertirían en objetivos interesantes para la exploración. En Marte deben existir actualmente zonas hidrotermales profundas en las que la vida podría perdurar hasta hoy. Varias lunas de Júpiter están listas para la investigación biológica, y también lo está Titán, una luna de Saturno tan grande como la Tierra y rica en compuestos orgánicos. Incluso algunos de los asteroides de mayor tamaño pueden albergar zonas húmedas y calientes, capaces de producir vida. Si la vida surgió en las profundidades de la Tierra la investigación (y el financiamiento) de la NASA para la exobiología podría durar muchas décadas.

Se puede decir que mis colegas del Instituto Carnegie y yo somos los recién llegados a este asunto del origen de la vida. Nuestros primeros experimentos de laboratorio patrocinados

por la NASA, en 1996, se diseñaron con el propósito específico de probar la síntesis orgánica en regímenes hidrotermales con fumarolas negras, donde prevalecen altas temperaturas y presiones. Como Miller, sometimos mezclas de gases simples a condiciones energéticas, en nuestro caso calor y superficies minerales químicamente reactivas, las mismas que uno esperaría encontrar en una zona volcánica profunda. Como Miller, produjimos aminoácidos, lípidos y otros bloques de construcción de la vida. Nuestros resultados, que ya han sido replicados y extendidos en muchos laboratorios, demuestran más allá de toda duda que resulta fácil sintetizar un conjunto de moléculas vitales en las condiciones extremas de la corteza exterior. Los gases volcánicos que contienen carbono y nitrógeno reaccionan fácilmente con las rocas y el agua de mar para formar virtualmente todos los bloques de construcción básicos para la vida.

Es más: estos procesos de síntesis son controlados por reacciones químicas relativamente suaves llamadas reacciones de reducción y oxidación, o reacciones redox, tales como la oxidación del hielo o la caramelización del azúcar, que conocemos bien. Éstas son el mismo tipo de reacciones químicas que la vida utiliza para el metabolismo, y contrastan drásticamente con los violentos efectos ionizantes de los relámpagos o de la radiación ultravioleta. De hecho, si bien los relámpagos pueden facilitar la producción de pequeñas biomoléculas, con la misma facilidad pueden convertir estos bloques de construcción en trizas moleculares. Para muchos de los que estamos en el negocio del origen de la vida tiene más sentido que la Tierra fabricara sus moléculas prebióticas mediante reacciones químicas menos energéticas, más o menos iguales que las de las células actuales.

Stanley Miller y sus seguidores hicieron todo lo que pudieron para desmentir nuestras conclusiones y cancelar nuestro programa de investigación. Durante un frenesí de publicaciones adversas argumentaron que las altas temperaturas de las fuentes hidrotermales destruirían de inmediato cualquier biomolécula útil que estuviera presente. «La hipótesis de las fuentes hidrotermales es un fracaso», se quejó Miller en una entrevista en 1998. «Ni siquiera entiendo por qué tenemos que hablar sobre ella». Miller y sus colaboradores basaban sus argumentos en algunos cuidadosos experimentos en los que las biomoléculas se degradaban en el agua hirviendo. Pero estos estudios simplistas no podían imitar la complejidad de la Tierra primordial; no tomaban en cuenta los enormes gradientes de temperatura y de composición de las profundidades del océano, el flujo turbulento y los ciclos de las fuentes hidrotermales, la complejidad química del agua de mar rica en minerales o las superficies protectoras de las rocas con las que hoy sabemos que se unen las biomoléculas. Finalmente, el estudio de los orígenes de la vida ha ido más allá del experimento Miller-Urey, y para muchos expertos las zonas profundas y oscuras de la Tierra son el escenario principal en el estudio del origen de la vida.

Como dije antes, es probable que *todos* los entornos antiguos que contaran con fuentes de energía y pequeñas moléculas con carbono produjeran su dotación de aminoácidos, azúcares, lípidos y otros bloques de construcción molecular. Una atmósfera salpicada por relámpagos o expuesta a una alta dosis de radiación sigue compitiendo como una teoría de la biogénesis, y también la de las fuentes hidrotermales y otros entornos profundos y calientes. Las biomoléculas se forman durante los impactos de asteroides, en las partículas de polvo bañadas por la luz solar en lo alto de la atmósfera y en nubes mole-

culares en las profundidades del espacio expuestas a los rayos cósmicos. Cada año llueven sobre la Tierra toneladas de polvo espacial cargado de compuestos orgánicos, y así ha sido por más de 4500 millones de años. Hoy sabemos que los bloques de construcción de la vida están diseminados por todo el cosmos.

Paso dos: selección

Hace medio siglo el mayor reto de la investigación sobre los orígenes de la vida era sintetizar las materias primas: los ladrillos y el cemento de la vida. Para principios del siglo XXI este problema estaba prácticamente resuelto; los científicos se dieron cuenta de que la Tierra debió haber estado cubierta con un consomé diluido de los ingredientes vitales para la vida. Buena parte de la atención se encuentra ahora en la selección, la concentración y en el ensamblaje de los biopedazos en macromoléculas para dar lugar a las membranas que rodean la célula, las enzimas que promueven sus reacciones químicas y los polímeros genéticos que transmiten información de una generación a la siguiente.

Existen dos procesos que probablemente desempeñaron un papel importante. Uno es el autoensamblaje, durante el cual un grupo de moléculas alargadas —lípidos— se agruparon en forma espontánea para formar las membranas que delimitaron las primeras células. Los lípidos tienen delgadas columnas vertebrales conformadas por alrededor de una docena de átomos de carbono, y en ciertas condiciones tienden a autoensamblarse en forma de esferas huecas microscópicas; las moléculas alargadas se alinean una al lado de otra como las semillas de un diente de león. En uno de los artículos más influyentes

que se han publicado sobre el tema del origen de la vida, el bioquímico de California David Deamer describe cómo extrajo un conjunto de estas versátiles moléculas orgánicas del meteorito Murchison, rico en carbono (una mezcla de sustancias químicas que se formaron en el espacio mucho antes que la Tierra), y encontró que pronto se organizaban por su cuenta en forma de diminutas esferitas parecidas a células, con un interior y un exterior, algo así como pequeñas gotas de aceite en el agua. Hace unos años, Deamer y yo descubrimos que las moléculas ricas en carbono que se forman bajo grandes temperaturas y presiones en las fuentes hidrotermales se comportan de forma muy parecida. Éste y otros experimentos demuestran que las vesículas rodeadas por una membrana son un rasgo inevitable del mundo prebiótico; el autoensamblaje de los lípidos debe haber desempeñado un papel clave en los orígenes de la vida.

El resto de los bloques de construcción de la vida no suelen autorganizarse, pero pueden concentrarse y organizarse en las superficies protectoras de las rocas y los minerales, en lo que se conoce como síntesis dirigida por plantillas moleculares, el segundo de los procesos de selección. Los experimentos que llevamos a cabo en el Instituto Carnegie a lo largo de la última década revelan que muchos de los bloques de construcción molecular más importantes se adhieren a prácticamente cualquier superficie mineral. Los aminoácidos, los azúcares y los componentes del ADN y del ARN se adsorben sobre los minerales más comunes en las rocas terrestres, que suelen formar parte del basalto y el granito: el feldespato, el piroxeno, el cuarzo y otros. Es más: cuando varias moléculas compiten por el mismo trozo de bienes raíces cristalinos, con frecuencia cooperan para producir sobre la superficie complejas estructuras propias que incluso pueden promover más adsorción y más organiza-

ción. Así, llegamos a la conclusión de que resulta muy probable que en cualquier zona del océano prebiótico que entrara en contacto con minerales surgieran grupos concentrados de moléculas vitales a partir del caldo amorfo.

Ahora bien, llegados a este punto tengo que hacer una advertencia. En la investigación sobre los orígenes de la vida (y probablemente en casi todas las demás disciplinas) los científicos se sienten atraídos hacia modelos que ponen de relieve su propia especialidad científica. Stanley Miller, que era químico orgánico, y su séquito creyeron que el origen de la vida era fundamentalmente un problema de química orgánica. Los geoquímicos, por el contrario, han tendido a concentrarse en escenarios más complejos que suponen variables como la temperatura y la presión y rocas químicamente complejas. Los expertos en moléculas de lípidos capaces de formar membranas promueven el «mundo lípido», mientras que los biólogos moleculares que estudian el ADN y el ARN consideran que el «mundo ARN» es el modelo a vencer. Los especialistas que estudian virus, o metabolismo, o arcillas, o lo profundo de la biosfera tienen sus propios prejuicios idiosincrásicos. A todos nos pasa; nos concentramos en las cosas que conocemos mejor, y contemplamos el mundo a través de esa lente.

Yo estudié mineralogía, así que no resulta muy difícil adivinar cuál es mi teoría predilecta sobre los orígenes de la vida. *Mea culpa*. Muchos otros científicos que investigan el origen de la vida también han llegado a esta conclusión; de hecho, varios biólogos importantes han empezado a acercarse a los minerales, porque los escenarios del origen de la vida que sólo contemplan los océanos y la atmósfera enfrentan problemas insuperables para explicar los eficientes mecanismos de selección y concentración molecular. Los minerales sólidos tienen un potencial inigualable para seleccionar, concentrar y organi-

zar moléculas, así que deben haber desempeñado un papel central en el origen de la vida.

Derecha e izquierda

Los procesos bioquímicos son complejos, con ciclos y redes de reacciones moleculares entrelazadas. Para que estos complejos procesos estratificados puedan funcionar las moléculas deben tener el tamaño y la forma justa. La selección molecular consiste en encontrar la mejor molécula para cada función bioquímica, y la selección dirigida por plantillas moleculares sobre la superficie de los minerales es hoy el principal candidato para explicar cómo se las arregló la naturaleza para llevarla a cabo.

Tal vez el reto más importante de la selección molecular es la quiralidad, la generalizada «lateralidad» de la vida. Muchas de las moléculas vitales vienen en pares que son imágenes especulares entre sí, variantes zurdas y diestras, como tus dos manos. Las parejas de moléculas quirales son idénticas en muchos sentidos: tienen la misma composición química, los mismos puntos de fusión y de ebullición, el mismo color y densidad y la misma conductividad eléctrica. Pero las moléculas zurdas y diestras tienen formas diferentes e incompatibles, algo que te resultará familiar si alguna vez has tratado de ponerte un guante zurdo en la mano derecha. Resulta que la vida es increíblemente quisquillosa: las células usan, en forma casi exclusiva, aminoácidos zurdos y azúcares diestros.

La quiralidad es importante. En el curioso caso del perfume artificial llamado limoneno la forma diestra produce olores parecidos a los de una naranja, pero la versión zurda de esta sencilla molécula con forma de anillo huele a limón. Los recepto-

res de olores dentro de tu nariz son sensibles a la quiralidad, así que el limoneno zurdo y el diestro transmiten señales ligeramente diferentes a tu cerebro. Las papilas gustativas son menos sensibles a las diferencias entre los azúcares zurdos y los diestros. Ambos son dulces, pero el sistema digestivo de nuestro cuerpo sólo está adaptado para procesar las formas diestras. El endulzante artificial tagatosa, un sustituto del azúcar sin calorías compuesto por una molécula zurda, explota estas propiedades. La trágica historia de la talidomida también tiene que ver con la lateralidad: la versión diestra de esta droga aliviaba las náuseas matinales de las mujeres embarazadas, pero la variante zurda, que venía inevitablemente pegada, provocaba defectos de nacimiento. Hoy en día la autoridad gubernamental impone reglas muy estrictas para producir drogas con quiralidad pura, y estas reglas salvan la vida de los consumidores, pero les cuestan aproximadamente 200 mil millones de dólares al año en costos adicionales de manufactura.

La mayor parte de los experimentos que sintetizan biomoléculas (incluyendo el de Miller-Urey y los experimentos con fuentes hidrotermales) producen cantidades iguales de moléculas zurdas y diestras, y la mayor parte de los procesos naturales tratan a ambas exactamente del mismo modo. De hecho, el mundo natural inerte es básicamente indiferente a la distinción entre izquierda y derecha. Pero para la vida es absolutamente necesaria la forma correcta: es esencial tener aminoácidos zurdos y azúcares diestros. Las moléculas con lateralidad opuesta simplemente no funcionan. Así que nuestro equipo de investigación abordó la pregunta de cómo hizo la vida para seleccionar los aminoácidos zurdos casi siempre en vez de los diestros, y azúcares diestros en vez de los zurdos.

Recientemente hemos llevado a cabo experimentos que exploran la posibilidad de que las superficies minerales quirales

hayan desempeñado el papel protagónico en la selección de moléculas con lateralidad, y tal vez incluso en los orígenes de la vida. En 2000, mis colegas y yo nos dimos cuenta de algo que entonces nos pareció sorprendente pero hoy es obvio: en la naturaleza las superficies minerales quirales están por todas partes. Los minerales más comunes, que pueden encontrarse en todas las rocas y todos los suelos, rebosan de superficies en las que los átomos forman «asideros» de escala molecular, algunos zurdos y otros diestros. En el mundo natural estas superficies minerales zurdas y diestras aparecen en proporciones estadísticamente iguales, así que en términos globales la Tierra no parece tener preferencia por la izquierda o la derecha. Pero a cada molécula individual sí le importa dónde va a terminar. Nuestros experimentos mostraron que ciertas moléculas zurdas pueden acumularse en un grupo de superficies cristalinas, mientras que su imagen especular, su contraparte diestra, se acumula igual de fácilmente en otro grupo de superficies minerales. Conforme las moléculas zurdas o diestras se separan y se concentran, cada superficie se convierte en un pequeño experimento de selección y organización molecular.

Es poco probable que uno solo de estos experimentos individuales con minerales y moléculas haya generado vida, pero imagina que tomas billones de billones de billones de superficies minerales, cada una bañada por un caldo orgánico rico en moléculas, y repites esos diminutos experimentos naturales una y otra vez a lo largo de cientos de millones de años. En algún momento, en algún lugar de la Tierra deben haberse probado prácticamente todas las combinaciones posibles de moléculas pequeñas. La diminuta fracción de las combinaciones moleculares que terminaron autoensamblándose más fácilmente, o que se adhirieron más fuertemente a las superficies minerales, o que tuvieron más estabilidad a las presiones y a

las temperaturas altas, sobrevivieron y tal vez incluso crecieron y aprendieron nuevos trucos.

Todavía no sabemos con precisión cuál de ese sinnúmero de combinaciones posibles de moléculas y minerales condujo a una organización semejante a la de los seres vivos, pero actualmente se están descubriendo los principios de la selección y la organización molecular. Se sintetizaron grandes cantidades de biomoléculas, y algunas de esas moléculas formaron racimos más y más grandes. Nuestros experimentos sugieren que la carga eléctrica desempeñó un papel muy importante. Algunas moléculas tienen una carga ligeramente positiva; otras tienen una carga ligeramente negativa, y otras más (como el agua) son polares, es decir que los dos extremos de la misma molécula tienen cargas ligeramente positivas y negativas, respectivamente. También los minerales tienen superficies cargadas eléctricamente, algunas positiva y otras negativamente. Si unes todas estas piezas cargadas eléctricamente, se organizan en forma espontánea, pues las cargas eléctricas positivas siempre atraen a las cargas eléctricas negativas. Así, en prácticamente todos los ambientes húmedos y ricos en minerales de la Tierra prebiótica ocurrieron diversos ensamblajes moleculares.

Paso tres: replicación

Ningún grupo de sustancias químicas puede estar vivo a menos que haga copias de sí mismo, sin importar qué tan compleja sea su estructura. El sello distintivo de la vida es la reproducción: un consorcio de moléculas se convierte en dos, dos se vuelven cuatro, y así sigue la cosa en progresión geométrica. El gran enigma en la historia de la biogénesis sigue siendo el surgimiento de este primer sistema de moléculas auto-

rreplicantes. Algunos experimentos muy ingeniosos replican porciones de los ciclos reproductivos que parecen convincentes, aunque todavía no hemos podido imitar por completo ese esquivo truco bioquímico en el laboratorio. Sin embargo, en algún punto del espacio y del tiempo una colección organizada de moléculas comenzó a duplicarse a costa de otras moléculas (es decir, «comida»).

Imagínate la Tierra a la edad de quinientos millones de años, hace más o menos cuatro mil millones de años. Contenía un caldo de moléculas orgánicas, tenía billones y billones de superficies minerales reactivas y cientos de millones de años para jugar con ellas. La mayor parte de las moléculas no hacía nada interesante ni tenía ninguna función útil. Pero una pequeña fracción de las moléculas orgánicas, ordenadas sobre superficies minerales, produjo algún tipo de estructura con una función mejorada, tal vez un mejor agarre a la superficie, o tal vez los medios para atraer más moléculas a la comunidad, o la tendencia a catalizar la destrucción de especies moleculares adversarias, o incluso la habilidad de hacer copias de sí misma. El mundo natural recompensaría con creces esta innovación, y una vez establecida la vida infestaría rápidamente todos los rincones habitables del globo.

Pero demos un paso atrás. ¿Por qué un grupo de moléculas comenzaría a autorreplicarse espontáneamente? La respuesta se encuentra en los dobles pilares evolutivos de la variación y la selección. Existen dos razones por las cuales los sistemas evolucionan. Primero, muestran enormes cantidades de configuraciones posibles; ésa es la variación. Segundo, algunas de esas configuraciones tienen muchas más probabilidades de sobrevivir que otras; ésa es la selección. Imagínate un conjunto prebiótico de cientos de miles de moléculas diferentes, todas hechas de carbono, hidrógeno oxígeno y nitrógeno, y tal vez

unas pizcas de azufre o de fósforo. La síntesis prebiótica (a la Stanley Miller) y las muestras naturales (por ejemplo, el meteorito de David Deamer) presentan este nivel de variación molecular. Pero no todas las moléculas fueron creadas iguales. Algunas moléculas eran relativamente inestables y se desintegraron, es decir, fueron eliminadas muy rápidamente de la competencia. Otras se agregaron en inútiles masas alquitranadas y se fueron flotando o se hundieron en el fondo del océano, donde ya no podían desempeñar ningún papel. Pero algunas moléculas resultaron ser especialmente estables, tal vez aún más cuando podían unirse a otras de su tipo o a una superficie mineral particularmente tentadora. Estas moléculas sobrevivieron y el caldo molecular se deshizo de las más débiles.

Las interacciones moleculares refinaron todavía más esta mezcla prebiótica. Algunos grupos de moléculas cooperaron entre sí para asirse a las superficies minerales, y así contribuyeron a la supervivencia de su hermandad. Otras moléculas pequeñas funcionaron como catalizadores: multiplicaron la presencia de algunas especies químicas al promover la formación de enlaces químicos o aceleraron la destrucción de otras especies químicas al romper sus enlaces. Así se separó el grano de la paja dentro del caldo molecular, pero en un mundo como éste eliminar a la competencia o simplemente aguantar en tu lugar no te aseguraba sobrevivir. El gran premio de la supervivencia estaba destinado al grupo de moléculas que aprendiera a hacer copias de sí mismo.

Existen tres modelos rivales que tratan de describir los primeros sistemas de moléculas autorreplicantes y semivivientes. El más sencillo de estos métodos (y por lo tanto, el que muchos preferimos) apunta a un ciclo que entendemos bien y que está formado por unas cuantas moléculas pequeñas: el ubicuo

ciclo del ácido cítrico. Comienza con ácido acético, que sólo contiene dos átomos de carbono. El ácido acético reacciona con el dióxido de carbono (CO_2) para formar ácido pirúvico (con tres átomos de carbono), que a su vez reacciona con más CO_2 para formar ácido oxaloacético, con cuatro átomos de carbono. Otras reacciones producen moléculas cada vez más grandes, hasta llegar al ácido cítrico, con sus seis átomos de carbono. El ciclo se vuelve autorreplicante cuando el ácido cítrico se divide espontáneamente en dos moléculas más pequeñas, ácido acético (dos átomos de carbono) más ácido oxaloacético (cuatro átomos de carbono), que también son parte del ciclo molecular. Así, un ciclo de moléculas se convierte en dos, dos se convierten en cuatro, etcétera. Es más, muchos de los bloques esenciales de la vida, entre ellos los aminoácidos y los azúcares, son sintetizados fácilmente por reacciones simples con las moléculas centrales del ciclo del ácido cítrico. Por ejemplo, sólo tienes que añadir amoniaco al ácido pirúvico y obtienes alanina, un aminoácido esencial. Todas las células vivas de la Tierra incorporan el ciclo del ácido cítrico, así que muy bien puede tratarse de una característica primordial, un fósil químico que desciende de la primerísima forma de vida. El ciclo no está vivo en sí mismo, pero tiene el potencial de replicar el círculo interior de moléculas a expensas de sustancias químicas menos fecundas.

En el extremo opuesto de la complejidad química está la red autocatalítica autorreplicante, un modelo defendido por Stuart Kauffman, quien llevó a cabo estudios teóricos pioneros en el famoso Instituto Santa Fe. Es posible que el caldo prebiótico haya incorporado, en un principio, cientos de miles de tipos diferentes de moléculas pequeñas, basadas en el carbono y provenientes de diversas fuentes. Hoy sabemos que algunas de esas sustancias catalizaron reacciones que fabricaron nuevas

moléculas, y que otras reacciones aceleraron la desintegración de sus vecinas. Una red autocatalítica está compuesta por un grupo de moléculas —tal vez miles de especies diferentes que trabajan al unísono— que aceleran la producción de otras como ellas y destruyen cualquier molécula que no forme parte de la red. Es el equivalente molecular de «los ricos se vuelven más ricos». Nuevamente, como con el ciclo del ácido cítrico, no puede considerarse que esta red molecular esté viva, pero en cierto sentido promueve la copia de sí misma, y es mucho más compleja que la mayor parte de los sistemas químicos no vivos.

Un tercer escenario, probablemente el más favorecido por los biólogos que hacen investigación sobre el origen de la vida, es el del mundo de ARN, un modelo basado en una hipotética molécula de ARN que hace copias de sí misma. Para entender por qué este escenario resulta atractivo tenemos que dar un nuevo paso atrás para pensar sobre las dos funciones más importantes de la vida: el metabolismo (fabricar cosas) y la genética (transferir información sobre cómo hacer cosas de una generación a la siguiente). Las células modernas usan las moléculas de ADN, con su estructura de escalera, para almacenar y copiar la información que se necesita para hacer más proteínas, pero usan proteínas plegadas en formas complejas para hacer ADN. Entonces, ¿qué vino primero: el ADN o las proteínas? Resulta que hay una tercera molécula, el ARN, que desempeña un papel crucial en ambos procesos.

El ARN es un polímero muy elegante, una larga molécula formada por una sola hebra hecha de moléculas individuales más pequeñas (llamadas nucleótidos), como las cuentas de un collar o las letras en una oración. Existen cuatro «letras» moleculares diferentes, llamadas A, C, G y U, que pueden alinearse en

cualquier secuencia imaginable, como un mensaje en código. De hecho, estas letras de ARN contienen información genética (igual que el ADN). Al mismo tiempo, el ARN puede plegarse en formas complejas que tienen la capacidad de catalizar reacciones químicas clave (igual que las proteínas). De hecho, las moléculas de ARN facilitan la síntesis de todas las proteínas, tanto al transportar la información genética como al catalizar la formación de proteínas. De este modo, de todas las diversas moléculas de la vida el ARN es la única que parece «hacer de todo».

El modelo del mundo de ARN se basa en el supuesto de que algún mecanismo químico que todavía no se entiende bien produjo enormes cantidades de hebras distintas de ARN, o tal vez una molécula muy similar capaz de transmitir información. Casi ninguna de esas hebras diferentes hizo gran cosa: simplemente sobrevivieron o se degradaron poco a poco. Sin embargo, algunas pocas hebras selectas tenían alguna clase de función que las beneficiaba: se plegaban para volverse más estables, o se aferraban a una superficie mineral segura, o tal vez destruían a sus rivales, otro ejemplo de la competencia molecular en el caldo primigenio.

La suposición central de la hipótesis del mundo de ARN es que una de estas incontables hebras aprendió el increíble truco de hacer copias de sí misma: se convirtió en una molécula autorreplicante. Esta idea no es tan inverosímil: después de todo, el ARN se parece mucho al ADN, que es capaz de hacer copias de sí mismo, y de hecho el ARN muta con facilidad. Así que sin importar si era ineficiente o torpe, la primera molécula de ARN autorreplicante pronto tendría que empezar a competir con montones de versiones ligeramente diferentes de sí misma, algunas de las cuales aprendieron a copiarse más rápido, o con

menos gasto de energía, o tal vez en ambientes ligeramente distintos. Esta precoz molécula de ARN parece satisfacer todos los requisitos de la vida: es un sistema químico autosustentable capaz de incorporar novedades y experimentar evolución darwiniana, en este caso evolución molecular.

Tal vez tomó un largo tiempo que apareciera ese sistema molecular funcional más o menos autorreplicante, ya fuera un ciclo de ácido cítrico, una red autocatalítica, o un ARN autorreplicante. Pero durante muchos millones de años ocurrió una cantidad inimaginable de combinaciones moleculares sobre billones y billones de superficies minerales a lo largo de los casi 518 millones de kilómetros cuadrados de la superficie de la Tierra. Y en algún momento y en algún lugar una de estas combinaciones, inconcebiblemente numerosas, funcionó. Aprendió a autorreplicarse y a evolucionar. Y ese invento cambió todo.

Los experimentos que el biólogo de Harvard Jack Szostak llevó a cabo en su laboratorio de Boston demuestran el poder de la selección en la evolución molecular. En muchos de sus experimentos el equipo de Szostak comienza con una mezcla de cien billones de secuencias diferentes de ARN, cada una de las cuales consta de una hebra conformada por una combinación aleatoria de las letras A, C, G y U. Entonces esta enorme colección de hebras de ARN, cada una de las cuales se pliega en forma diferente, es enfrentada a una tarea, por ejemplo enlazarse fuertemente con alguna otra molécula que tiene una forma particular. El equipo de Szostak vierte una solución con los cien billones de hebras en un matraz con pequeñas cuentas de vidrio, cada una de las cuales está recubierta con esta molécula de forma particular. Estas moléculas cuelgan en la solución rica en ARN como si fueran ganchitos. La enorme mayoría de las moléculas de ARN no responde; tienen la forma incorrec-

ta y no pueden interactuar. Pero una diminuta fracción de los ARN plegados se une a las moléculas objetivo y se aferra con fuerza.

Entonces empieza la diversión, porque los colegas de Szostak vacían la vieja solución (adiós a los casi cien billones de hebras no funcionales de ARN) y recuperan las pocas hebras que, por virtud de las formas que adoptaron por casualidad, se pegan a las cuentas de vidrio. Luego, con ayuda de algunos trucos muy comunes en tecnología genética que imitan ciertos procesos prebióticos verosímiles, preparan un nuevo lote de cien billones de hebras de ARN, pero esta vez todas las hebras son más o menos parecidas, cada una un mutante de una de las hebras funcionales originales. Al repetir los pasos que se explican antes se produce una nueva población de hebras de ARN funcionales, pero algunas de las variantes de esta segunda generación se enlazan mucho mejor que cualquiera de la primera generación. Algunas de las hebras hijas mutantes lo hacen significativamente mejor que sus padres. Si este proceso se repite unas cuantas veces más las hebras de ARN resultantes se hacen cada vez mejores para enlazarse, hasta que los mejores mutantes son perfectamente funcionales, pues se enlazan con sus objetivos con la energía de enlace más alta posible.

El experimento toma unos cuantos días: lleva menos de una semana pasar de las hebras aleatorias a la molécula perfecta. Pero si le pides a un equipo conformado por los químicos más brillantes del mundo que diseñen una hebra de ARN funcional desde cero les resultaría prácticamente imposible mediante cualquier método computacional conocido. Actualmente no existe ningún método que pueda predecir exactamente cómo se va a plegar una hebra larga de ARN, o cómo va a enlazarse a otras moléculas con formas complejas. La evolución molecu-

lar, y no el diseño inteligente, es sin duda el camino más rápido y confiable para desarrollar funciones. (Por eso decimos que si Dios creó la vida, fue lo suficientemente listo para usar la evolución).

La explosión de la vida

En el caldo prebiótico cualquier molécula que adquiriera una función útil, por más pequeña que fuera, tenía una gran ventaja. Pero estos juegos bélicos moleculares palidecen frente a la ventaja que poseía una hebra de ARN que tuviera una función útil y que pudiera hacer copias de sí misma. Esta molécula autorreplicante aseguraba su propia supervivencia al producir hijas más o menos idénticas. De hecho, el proceso de copiado molecular era bastante desordenado, así que algunas de esas copias de ARN eran mutantes. Y si bien la mayor parte de las mutaciones resultaban letales o no le conferían a su dueño ninguna ventaja significativa, algunos individuos con suerte opacaron a su padres, y el sistema evolucionó. Por un simple proceso de errores de copiado la molécula autorreplicante original debe haber producido descendientes que toleraron condiciones más extremas de presión o calor o salinidad, o se replicaron más rápido, o encontraron nuevas fuentes de comida, o destruyeron a sus vecinos más débiles. Las hebras de ARN que encontraron la protección de una superficie mineral o el refugio de una membrana cerrada tuvieron ventajas aún mayores.

Sin ninguna competencia, las primeras moléculas autorreplicantes devoraron, en apenas un instante geológico, todas las zonas ricas en nutrientes de la Tierra. Tal vez resulte absurdo pensar que un objeto microscópico pudo tomar el control, pe-

ro digamos, en forma hipotética, que a la primera molécula autorreplicante, todavía no muy eficiente, le tomó una semana duplicarse una vez. (En contraste, muchos microbios modernos pueden replicarse en unos cuantos minutos). Semana tras semana, dos hebras se volvieron cuatro, cuatro se volvieron ocho, etcétera. A este paso les habría tomado medio año formar un cúmulo de cien millones de moléculas autorreplicantes, un objeto tan grande que sería posible percibirlo a simple vista. En otras veinte semanas esa masa de ARN se habría expandido lo suficiente como para llenar un dedal. Y a este paso tendrían que pasar otras veinte semanas para que todas las manifestaciones primigenias de la vida llenaran una bañera de buen tamaño.

Pero esta duplicación continua, semana con semana, pronto habría producido una transformación extraordinaria. En otras veinte semanas el mundo tendría kilómetros y kilómetros de aguas infestadas de ADN, tal vez a lo largo de las costas, en un lago tierra adentro o en las profundidades del mar. Y en dos años más, siempre suponiendo que la primera hebra de ARN se duplicaba cada semana, la Tierra podría estar cubierta por un millón de kilómetros cúbicos de materia viva, suficiente para taponar por completo el mar Mediterráneo.

Los organismos unicelulares primitivos que se alimentaban de la energía química de las rocas no pudieron haber tenido un efecto considerable en la geología de la Tierra, por ejemplo en la distribución de las rocas sobre la superficie o la diversidad de minerales. Hace cuatro mil millones de años la superficie de la Tierra —ya sea que albergara vida o no— seguía siendo una estéril superficie de color negro y gris; la erosión era muy lenta y las primeras formas de vida no habrían contribuido casi nada a alterar los azules océanos que cubrían el planeta.

Estos primeros microbios eran muy aguerridos, pero como no dejaron ninguna marca no podemos estar seguros de cuándo comenzó la vida. Algunas de las rocas sedimentarias más antiguas de la Tierra, que se formaron en océanos someros hace 3500 millones de años, contienen algunos fósiles microbianos inconfundibles. En estos entornos acuáticos poco profundos se formaron unas estructuras cupulares llamadas estromatolitos, que podían medir desde unos centímetros hasta unos cuantos metros de diámetro y que estaban compuestas por colonias de células que precipitaban, estrato por estrato, una fina capa de minerales. Los tapetes microbianos cubrieron grandes franjas de costa y consolidaron y dieron forma a la arenas en las zonas de mareas. Incluso han sobrevivido a los eones algunas esferas ricas en carbono que tienen paredes celulares características y que pueden ser fósiles de microbios, pero no se han encontrado fósiles incontrovertibles más antiguos que éstos. Resultan muy intrigantes algunos rastros geoquímicos de carbono y de otros bioelementos que aparecen en rocas intensamente alteradas de 3850 millones de años de edad, pero no han convencido para nada a la comunidad geológica.

¿Así que cuándo surgió la vida? Si intuyes que la vida surge rápidamente y con frecuencia en cualquier planeta o luna que tenga las condiciones adecuadas, tal vez defenderías que hace 4400 millones de años, cuando la Tierra tenía ciento cincuenta millones, ya existía una biosfera estable. Allí estaban todos los ingredientes: océanos y aire, minerales y energía. Los enormes impactos de asteroides y cometas habrían desafiado la supervivencia de esta vida hadeana, y tal vez habrían favorecido a las células más fuertes, aquellas que aprendieron a vivir en hogares rocosos, profundos y calientes, bajo el fondo del mar. Tal vez la vida surgió más de una vez, tal vez muchas, an-

tes de que la Tierra se instalara en una época más tranquila de posadolescencia. Si es así, estos fósiles de 3500 millones de años representarían un ecosistema que ya entonces tenía casi mil millones de años de evolución.

Si, por el otro lado, sospechas que el surgimiento de la vida en el cosmos es un proceso inusual y difícil, te parecerá que la fecha más cercana, de 3500 millones de años, es la más certera. Tal vez la vida es tan improbable que hicieron falta mil millones de años de interacciones entre minerales y moléculas, a lo largo de cientos de millones de kilómetros cúbicos de corteza oceánica, para que apareciera. Tal vez esos pocos restos fósiles del eón Arqueano, preciosos y dispersos, señalan en efecto el principio de la biosfera.

La Tierra viva

Ya sea que la vida surgiera hace 4400 millones de años o hace 3800, lo cierto es que alteró muy poco la superficie de la Tierra. Esos primeros microbios no hicieron más que aprender algunos trucos químicos que la Tierra ya sabía. Desde los primeros días de nuestro planeta han ocurrido reacciones químicas sobre su superficie sólida, o cerca de ella. Todo se reduce a la distribución de electrones: el manto terrestre tiene, en promedio, más electrones por átomo que la corteza. El manto es más «reducido» y la superficie más «oxidada», en el argot de la química. Cuando las sustancias reducidas y oxidadas se encuentran —por ejemplo, cuando el magma y los gases reducidos del manto se abren paso hacia la superficie más oxidada durante una erupción volcánica— con frecuencia experimentan una reacción química que libera energía. En el proceso, los electrones se transfieren de los primeros a la última.

La producción de herrumbre, en la que el hierro reacciona con el oxígeno, es un ejemplo común de esta reacción. El hierro metálico está atiborrado de electrones; tiene tantos que, como recordarás, algunos son libres de vagar a lo largo del brillante metal y conducir la electricidad. El hierro es, pues, un donante de electrones. El oxígeno gaseoso, por el otro lado, está tan privado de electrones que las parejas de átomos de oxígeno deben compartir sus recursos para formar una molécula de O_2, en la cual ambas comparten su escaso suministro de electrones como si fuera comida en una isla desierta. El oxígeno es el aceptor ideal de electrones. Así que cuando el hierro metálico se encuentra con moléculas de oxígeno le sigue un rápido intercambio de electrones. Cada átomo de hierro entrega dos o tres electrones, y cada átomo de oxígeno toma dos electrones. El resultado de este intercambio es un nuevo compuesto químico, el óxido de hierro, así como una pequeña descarga de energía.

Además del hierro había otros elementos metálicos saturados de electrones, como el níquel, el manganeso y el cobre, que también estaban expuestos a la oxidación. También estaban presentes muchas de las sencillas moléculas basadas en carbono que habían sido sintetizadas durante los procesos prebióticos, entre ellos el metano (un gas natural), el propano y el butano. El oxígeno gaseoso era escaso en la atmósfera temprana de la Tierra, pero estaban ampliamente disponibles otras colecciones de átomos con hambre de electrones, entre ellos el sulfato (SO_4), el nitrato (NO_3), el carbonato (CO_3) y el fosfato (PO_4), todos listos para adoptar sus funciones.

Antes de que apareciera la vida las reacciones redox ocurrían a un ritmo relativamente pausado. Pero los primeros microbios aprendieron a barajar electrones a un ritmo mucho mayor. En muchos lugares, como en las costas primitivas, en

las aguas someras y en los sedimentos del fondo del mar las células vivientes se convirtieron en mediadores de estas reacciones. Había comunidades de microbios que se ganaban la vida acelerando el ritmo de las reacciones de las rocas y usando la energía resultante para vivir, crecer y reproducirse. Por supuesto, la Tierra había fabricado óxidos de hierro desde el principio, pero los primeros microbios los hicieron más rápido. En el proceso, la vida comenzó a alterar el ambiente de la superficie de la Tierra, si bien todavía muy despacio. Los microbios explotaron la abundante energía que estaba a su disposición en forma de hierro reducido, disponible en los océanos del Hadeano y el Arqueano, y oxidaron hierro para formar el mineral rojo hematita, una transformación química que puede liberar suficiente energía para mantener todo un ecosistema. En Australia, América del Sur y otros viejos terrenos se pueden ver enormes formaciones de hierro bandeado que tal vez representen los desechos de un épico bufet microbiano que duró decenas de millones de años. Y así comenzó la extraordinaria coevolución de la geosfera y la biosfera.

La evolución por selección natural continuó impulsando todos estos procesos. Las especies de microbios que aprendieron a usar más eficientemente el hierro que les servía como alimento, o a tolerar condiciones más extremas, o a explotar nuevas reacciones redox, tuvieron una clara ventaja y aseguraron su propia supervivencia. Así, nuevas poblaciones de microbios mutantes inventaron nuevos catalizadores que promovieron estas reacciones productoras de energía en forma más eficiente que el medio ambiente no vivo. Los resultados, dispersos por aquí y por allá, fueron pequeños cúmulos de caliza y algunos depósitos modestos de óxidos de hierro, así como un incremento gradual en el procesamiento del carbono, el azufre, el nitrógeno y el fósforo que se encontraban cerca de la su-

perficie. Sin embargo, hasta ahora las primeras formas de vida no hicieron más que imitar la química que ya existía (si bien en forma más pausada) en el mundo hasta entonces inerte.

Luz

La mayor parte de los investigadores de los orígenes de la vida sospechan que las primeras formas de vida dependieron exclusivamente de la energía química de las rocas; una fuente de energía abundante, es cierto, pero que restringía mucho las zonas en las que podía prosperar la vida. En algún momento unos cuantos microbios fueron más allá de su papel como mediadores de reacciones químicas intrínsecas a su medio ambiente y aprendieron a recolectar la radiación solar, que proveería a cualquier habitante de la superficie, en cualquier lugar del planeta, de una fuente de energía barata y abundante.

En su forma más básica, la fotosíntesis usa luz solar para fabricar moléculas a partir de materias primas tan ubicuas como dióxido de carbono, nitrógeno y agua. Si se tienen los andamios químicos correctos se pueden fabricar todos los bloques de construcción esenciales para la vida —los aminoácidos, los azúcares, los lípidos y los componentes del ADN y del ARN— a partir de los gases atmosféricos y de la radiación solar. A diferencia de las algas verdes actuales, los primeros fotosintetizadores microbianos no generaron oxígeno. De hecho, algunos análogos modernos de estos organismos primitivos tienden a formar una capa de color pardo o purpúreo sobre el agua estancada. Algunos biólogos incluso han sugerido que sobre los azules océanos arqueanos deben haber flotado inmensas balsas de microbios fotosintéticos que decoloraron sus aguas con unas feas manchas parduzcas.

¿Cómo podemos saberlo? Estos microbios no tenían partes duras que pudieran fosilizarse, y los tapetes microbianos flotantes no alteran de ningún modo evidente el registro geológico. Sin embargo, puede haber una forma de conseguir evidencias incluso de los más antiguos microbios amantes de la luz. Las células fotosintéticas dependen en parte de hopanos, moléculas con una estructura característica de cinco anillos de carbono entrelazados (una configuración muy parecida a la de los esteroides de los que tanto se habla hoy en las noticias deportivas). Cuando los microbios mueren y se degradan sus reveladores esqueletos de hopano, con sus múltiples anillos, pueden sobrevivir durante miles de millones de años como un residuo molecular en los finos sedimentos oceánicos. Se requiere un proceso químico muy meticuloso para extraer y analizar estos geohopanos a partir de las rocas. Las interpretaciones no pueden ser más que provisionales, y por fuerza incluyen una letanía de complicadas conjeturas sobre posibles fuentes de contaminación, tanto antiguas como recientes. La comunidad paleontológica recibe con recelo —o con abierto escepticismo— cada nuevo reporte sobre moléculas que sobreviven miles de millones de años. Y sin embargo, allí están los rastros químicos, y pueden ser nuestra mejor ventana hacia esta tenue biosfera antigua. (Más sobre el tema en el capítulo 7.)

Para el cumpleaños mil millones de nuestro planeta la vida había afianzado una presencia firme, si bien relativamente intrascendente, sobre su superficie. Durante los siguientes mil millones de años la vida microbiana de la Tierra se abriría paso poco a poco en los entornos cercanos a la superficie, primero al acelerar las reacciones redox y luego mediante la fotosíntesis. Hasta donde podemos saber, a sus dos mil millones de

años de edad la Tierra aún no mostraría en su superficie ninguna novedad mineralógica de importancia que hubiera sido producida por la vida. Las células simplemente fabricarían más óxidos de hierro, más caliza, más sulfatos y fosfatos de los que habrían podido producirse de otro modo. Construirían grandes depósitos estratificados de minerales ricos en hierro en las profundidades del océano y manufacturarían algunos cúmulos de roca para protegerse en las zonas someras de las costas. Todos éstos son fenómenos que ya ocurrían en la Tierra antes del origen de la vida, y también en otros planetas y lunas del sistema solar.

Pero la Tierra y su primitiva población de microbios estaban destinados a realizar la transformación más dramática en la historia de nuestro planeta. Durante los siguientes 1500 millones de años los microbios fotosintéticos aprenderían un nuevo truco químico: exhalar un gas sumamente reactivo y peligrosamente corrosivo llamado oxígeno.

EDAD DE LA TIERRA (miles de millones de años)

0	1	2	3	4	4-5,6,7
	Eón Hadeano	*Eón Arqueano*	*Eón Proterozoico*	*Eón Fanerozoico*	

↑

Capítulo 7
La Tierra roja

La fotosíntesis y la Gran Oxidación

Edad de la Tierra: de 1000 a 2700 millones de años

Adelantemos la película hasta el presente. Resulta que la vida ha transformado irrevocablemente la superficie de la Tierra, en particular los océanos y la atmósfera, pero también las rocas y los minerales. Tras la aparición de la primera célula viviente aún tendrían que pasar mil millones de años para que esa transformación realmente comenzara. En el ínterin es posible que algunas variedades de microbios crearan capas parduzcas o violáceas en algunas regiones costeras. Tal vez incluso había zonas de limo verdoso que decoraban las costas ecuatoriales o habitaban los estanques someros donde algunas células muy astutas experimentaban con nuevas formas de emplear la energía radiante del Sol. Pero los continentes seguían desnudos: ninguna planta se aferraba al paisaje rocoso, ni existían animales para comérsela. Todavía habrías muerto, de un modo horrible, de haberte quedado atrapado en este mundo anóxico.

En apenas un pestañeo geológico, sin embargo, esa desluciada superficie gris se volvió color rojo ladrillo con el invento de

la fotosíntesis productora de oxígeno y la aparición de una atmósfera oxidante. Es difícil documentar con precisión cuándo y qué tan rápidamente evolucionaron las algas verdes para desencadenar esta transformación, conocida como la Gran Oxidación. Nuestros mejores indicios provienen de algunos cambios sutiles en el registro geológico que sugieren un chispazo de fotosíntesis poco después del cumpleaños dos mil millones de la Tierra, hace unos 2500 millones de años. Tras ese modesto inicio todo ocurrió relativamente rápido: hace 2200 millones de años el oxígeno atmosférico había subido de cero a más de uno por ciento de sus niveles modernos, y esto cambió para siempre la superficie de la Tierra.

La intrigante historia de la oxigenación inicial de la Tierra está comenzando a aclararse, conforme se descubren nuevas pistas y se siguen nuevas y prometedoras líneas de investigación. Durante el último medio siglo la investigación paleoatmosférica ha visto muchas ideas contrastantes y algunas diametralmente opuestas, pero el método científico es un gran cedazo para separar lo insostenible y lo falso. Todavía no conocemos toda la historia, pero nos estamos acercando y la imagen que va surgiendo poco a poco quita (literalmente) el aliento.

El testimonio de las rocas

Las pruebas de que ocurrió la Gran Oxidación vienen de un catálogo, cada vez más poblado, de observaciones de rocas y minerales que abarcan una gran parte de la historia de la Tierra, más o menos entre 3500 y 2000 millones de años atrás. Por un lado, muchas rocas de más de 2500 millones de años de edad contienen minerales que son fácilmente destruidos

por los efectos corrosivos del oxígeno, lo que sugiere que antes de ese momento existía un ambiente libre de éste. Los geólogos encuentran guijarros redondeados y poco erosionados de pirita (el sulfuro de hierro que también se conoce como «oro de los tontos») y uranitita (el mineral de uranio más común) en viejos lechos de arroyos, lugares en donde estos minerales se corroerían y desintegrarían rápidamente en la atmósfera rica en oxígeno que existe en nuestros días. Estos viejos lechos de arena también tienen una química muy reveladora, con una concentración inusual de elementos que evitan el oxígeno, como el cerio, y al mismo tiempo son notablemente deficientes en otros como el hierro, en comparación con los suelos modernos. Estas peculiaridades químicas ayudan a probar que la atmósfera estaba totalmente carente de oxígeno.

En contraste, las rocas que tienen menos de 2500 millones de años de edad contienen muchas señales inequívocas de oxígeno. Hace entre 2500 y 1800 millones de años se acumularon cantidades asombrosas de enormes depósitos de óxidos de hierro llamados formaciones de hierro bandeado. Estas densas acumulaciones, muy características de estratos alternados de óxidos negros y rojos, contienen el 90 por ciento de las reservas conocidas de hierro. También aparecen de pronto óxidos de manganeso, en forma de gruesos depósitos estratificados que hoy constituyen los depósitos principales de yacimientos de manganeso en el mundo. Tras la Gran Oxidación también aparecen en el registro geológico, por primera vez, cientos de minerales nuevos, como yacimientos oxidados de cobre, níquel, uranio y otros. Y sin embargo, y a pesar de este extendido repertorio mineralógico, algunos científicos todavía no se convencían de que la Gran Oxidación hubiera sido tan importante. Tal vez la cantidad de oxígeno atmosférico se incremen-

tó poco a poco. Tal vez el registro geológico, irregular y erosionado, es incompleto y engañoso.

Las pruebas irrefutables de la Gran Oxidación provienen de una fuente inesperada: algunos datos recientes —y sorprendentes— sobre los isótopos de un elemento común, el azufre. La década de 1990 vio un aumento dramático en la resolución y la sensibilidad de los espectrómetros de masas, los instrumentos fundamentales para analizar el mundo de los isótopos. La nueva generación de espectrómetros de masas le permitió a los científicos analizar muestras cada vez más pequeñas, incluso granos minerales dentro de células vivas, con más y más precisión. El azufre, uno de los elementos esenciales para la vida, resultó ser un objeto de estudio particularmente tentador, pues en la naturaleza existen cuatro isótopos estables de azufre: azufre-32, -33, -34 y -36. Todos estos isótopos tienen los 16 protones de rigor en el núcleo, pero el número de neutrones fluctúa entre 16 y 20.

La distribución de los isótopos del azufre suele poder predecirse simplemente con base en su masa. Todos los átomos se agitan, pero los isótopos menos masivos se agitan más, de modo que en cualquier reacción química los isótopos ligeros tienen más probabilidades de dar brincos que los pesados. Este proceso de selección, llamado fraccionamiento de isótopos, ocurre cada vez que un grupo de átomos de azufre experimenta una reacción química, ya sea en la roca sólida o dentro de una célula viva. En el caso del azufre, un isótopo de masa 32 se fraccionará más que un isótopo de masa 34 o 36. Es más, la tasa de fraccionamiento suele estar directamente relacionada con la proporción de las masas en el isótopo: el fraccionamiento del azufre-36 a azufre-32 casi siempre es del doble que el fraccionamiento del azufre-34 a azufre-32. Esta regla física básica se desprende directamente de las leyes de Newton: la

fuerza es igual a masa por aceleración. Una masa menor significa más aceleración, así que bajo una fuerza dada el azufre-32 se agita más que el azufre-34, que a su vez se agita más que el azufre-36.

Hace una década, el geoquímico James Farquhar, que por entonces trabajaba en el campus de San Diego de la Universidad de California, un lindo lugar a la orilla del mar, encontró un cambio profundo e inesperado en la distribución de isótopos de azufre en rocas que tenían más de 2400 millones de años. Las rocas y los minerales más recientes casi siempre exhiben la tendencia que uno esperaría y que depende de su masa: las proporciones de isótopos de azufre dependen casi exclusivamente de las proporciones de sus masas. Pero Farquhar y sus colegas encontraron en muchas rocas de más de 2400 millones de años un fraccionamiento de isótopos de azufre radicalmente diferente; en algunas muestras las desviaciones eran de varias milésimas (que en este caso es mucho). ¿Qué podría haber causado una desviación *independiente de la masa* de las irrefutables leyes newtonianas del movimiento?

Algunos teóricos astutos, respaldados por pruebas experimentales, señalaron rápidamente una solución en las sutilezas de la mecánica cuántica. Bajo la influencia de la radiación ultravioleta el comportamiento de los isótopos puede desviarse del ideal newtoniano. Resulta que los isótopos con un número impar de masa, como el azufre-33, pueden ser afectados selectivamente por la radiación ultravioleta (UV). Si una molécula de dióxido de azufre o de sulfuro de hidrógeno incorpora un isótopo de azufre-33, y si esa molécula se topa con un rayo ultravioleta (seguramente en lo alto de la atmósfera) es posible que reaccione más rápidamente. El azufre-33 experimenta un «fraccionamiento independiente de la masa» que distorsiona las proporciones de los isótopos.

Pero ¿por qué ocurrió este cambio repentino en la Tierra hace 2400 millones de años? La respuesta se encuentra en las propiedades de absorción de radiación UV del ozono, una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno que ha salido mucho en las noticias durante las dos últimas décadas. Actualmente el ozono que se encuentra en la parte superior de la atmósfera sirve como una barrera esencial para los rayos UV del Sol, potencialmente letales. Las mediciones que se han hecho durante las dos últimas décadas revelan que esta alta capa de ozono se ha adelgazado mucho, seguramente por las reacciones destructivas que provocan productos químicos que producimos los humanos, llamados clorofluorocarbonos, o CFC. (El freón, que alguna vez se usó en los aires acondicionados, es el ejemplo mejor conocido). Este «agujero de ozono» permite que más radiación UV cancerígena alcance la superficie de la Tierra. Las buenas noticias son que la prohibición mundial a la producción de CFC parece estar permitiendo que la capa de ozono se recupere rápidamente.

Antes de que aumentara el oxígeno gaseoso y de que apareciera una capa de ozono que funcionara como un bloqueador cósmico para nuestro planeta, los compuestos de azufre que se encontraban en lo alto de la atmósfera sufrían un baño continuo de radiación ultravioleta. Bajo esas duras condiciones los compuestos con azufre-33 experimentaron fraccionamiento independiente de la masa. Tras la Gran Oxidación se acumuló una capa protectora de ozono que absorbió buena parte de la radiación UV del Sol y canceló así este extraño efecto en la producción de isótopos.

Como los hallazgos de Farquhar fueron replicados y ampliados en laboratorios de todo el mundo, la mayor parte los científicos dedicados al estudio de la Tierra terminó aceptando que en efecto existió la Gran Oxidación. A menos que los

científicos descubran que existió un mecanismo para bloquear los rayos ultravioleta diferente del ozono, los datos de los isótopos de azufre permiten fijar el comienzo de la Gran Oxidación hace unos 2400 millones de años.

A hacer oxígeno

¿Entonces de dónde vino todo el oxígeno? Últimamente uno de los primeros temas de los que se habla en cualquier clase de introducción a la biología es la fotosíntesis, esa extraordinaria capacidad de las plantas de combinar agua, dióxido de carbono y luz solar para fabricar sus tejidos, y de producir oxígeno como desecho. Hoy damos por sentado que las plantas son indispensables para que nuestro mundo sea un lugar habitable, pero el descubrimiento de la fotosíntesis fue uno de los mayores avances de la ciencia. Y como muchos otros descubrimientos fundamentales, se produjo por etapas.

Primero se descubrió el papel del agua. Para los científicos del siglo XVII los mecanismos exactos del crecimiento de las plantas resultaban un misterio, pero generalmente se suponía que sus tejidos provenían del suelo rico en minerales, que las plantas debían consumir para crecer. El físico flamenco Jan Baptista Van Helmont (1579-1644) puso esta idea a prueba en la década de 1640 mediante un sencillo experimento que describió así:

> *Tomé un recipiente de Terracota en el cual coloqué 200 libras de Tierra que había sido secada previamente en un Horno, y que humedecí con agua de Lluvia, y planté ahí un Retoño o Brote de un Sauce, que pesaba cinco libras; y cuando hubieron transcurrido cinco años el Árbol que brotó pesaba 169 libras, y aproximadamente tres onzas: Pero humedecí el recipiente de Terracota con agua de Lluvia o agua destilada (y esto siempre que era necesario)… Al final sequé nuevamente la tierra del recipiente, y encontré las mismas 200 libras, menos unas dos onzas. Por lo tanto, 164 libras de Madera, Corteza y Raíces se produjeron a partir del agua solamente.*

El descubrimiento de Van Helmont fue un gran avance, aunque el agua (hoy lo sabemos) era sólo parte de la historia.

Un siglo después el clérigo y naturalista inglés Stephen Hales sugirió por primera vez que además del agua las plantas dependen de algunos componentes del aire: trazas de dióxido de carbono atmosférico. Hoy sabemos que tanto el agua en el suelo como el dióxido de carbono en el aire son los ingredientes principales de los organismos fotosintéticos. (Resulta irónico que Van Helmont también descubriera el gas dióxido de carbono pero que nunca supiera cuál era su papel en el crecimiento de las plantas).

Pero el papel que desempeñaba la luz solar seguía siendo enigmático, y tuvieron que transcurrir otros tres siglos para que empezaran a entenderse los detalles. Los avances en física nuclear sentaron las bases de esta comprensión, pues una nueva generación de aceleradores de partículas llamados ciclotro-

nes nos ofreció por primera vez un suministro estable del isótopo carbono-11, muy radiactivo y muy bueno para detectar reacciones biológicas. A finales de la década de 1930, Samuel Ruben y Martin Kamen, en la Universidad de California en Berkeley, expusieron algunas plantas a dióxido de carbono con una «etiqueta» de carbono-11. Así pudieron usar la señal radiactiva para seguir el dióxido de carbono conforme la planta lo incorporaba a sus tejidos. Claro que la vida media del carbono-11, de unos breves 21 minutos, hacía que estos experimentos resultaran extraordinariamente difíciles de realizar.

Pero en 1940 Ruben y Kamen descubrieron una forma de fabricar carbono-14, un isótopo de rastreo mucho más adecuado gracias a su cómoda vida media de 5730 años; esto revolucionó la investigación biofísica y pronto llevó a entender cómo es que las plantas aprovechan el agua, el dióxido de carbono y la luz solar. En resumen, existe una proteína muy ingeniosa (y muy antigua) llamada rubisco —que se encuentra en una clase de cianobacterias pioneras que se cree que se remontan a tres millones de años o más— y que concentra el dióxido de carbono y el agua, absorbe la energía del Sol y usa las materias primas para fabricar bloques de construcción biológica. Durante la reacción de fotosíntesis que produce el oxígeno que respiramos, las algas o las plantas consumen seis moléculas de dióxido de carbono y seis moléculas de agua para construir una molécula del azúcar glucosa, con seis moléculas de oxígeno como subproducto. Esta transformación química es otro ejemplo de nuestra vieja amiga, la reacción redox (que ocurre también en la oxidación del hierro). En este caso los átomos de carbono en el dióxido de carbono ganan electrones y por lo tanto se reducen, mientras que el agua u otro donante de electrones se oxida. En la fotosíntesis los rayos del Sol proveen la energía necesaria para el intercambio de electrones.

Descrita en términos generales esta reacción química suena bastante sencilla —el dióxido de carbono más agua (u otra sustancia química que pueda suministrar electrones) fabrica azúcares y otras biomoléculas— pero los detalles de la fotosíntesis son inmensamente complicados, y todavía estamos tratando de entenderlos. Para empezar, los microbios han inventado muchas formas diferentes de cosechar la luz solar y otras fuentes de energía. La mayor parte de las plantas y las algas actuales que producen oxígeno usan un brillante pigmento verde llamado clorofila para absorber luz en el espectro rojo y violeta. Pero a lo largo de la historia de la Tierra algunas células han usado otras rutas fotosintéticas que no producían nada de oxígeno. Han evolucionado pigmentos capaces de absorber luz de muchos colores y que decoran las algas rojas y pardas, las bacterias púrpuras, los líquenes y las espectaculares diatomeas. Algunos microbios emprendedores incluso alimentan sus reacciones fotosintéticas con radiación infrarroja, longitudes de onda que son totalmente invisibles para nuestros ojos pero que podemos sentir sobre la piel en forma de energía calorífica.

El bioquímico Robert Blankenship, que ocupa una posición importante tanto en el departamento de química como en el de biología de la Universidad de Washington en St. Louis, se dedica a investigar el complejo origen de la fotosíntesis. Blankenship y sus colaboradores, entre ellos algunos viejos colegas del influyente equipo de astrobiología de la Arizona State University, buscan señales de las primeras formas de vida, tanto en la Tierra como en otros mundos. Su estrategia es estudiar las diversas rutas fotosintéticas que poseen muchas clases de microbios actuales —púrpuras, pardos, amarillos y verdes— y comparar sus genomas para encontrar diferencias y similitudes. Cada uno de los diversos aspectos del complejo

aparato fotosintético ofrece nuevos datos: la naturaleza múltiple de los pigmentos fotosintéticos, las secuencias moleculares exactas de los «centros de reacción» proteicos que transfieren electrones de una molécula a otra, las muchas formas en que esos electrones son usados para fabricar los bloques de construcción de las células, e incluso la infinidad de estructuras de los «sistemas de antena». (Sorprendentemente, las células han desarrollado grupos de moléculas que funcionan como diminutas antenas recolectoras de luz).

Blankenship ha descubierto que los seres vivos desarrollaron una desconcertante diversidad de estrategias fotosintéticas; la vida, al parecer, es capaz de explotar cualquier fuente de energía que tenga a la mano. Una y otra vez los microbios se las han ingeniado para encontrar nuevas formas de recolectar luz para crecer y reproducirse; existen al menos cinco rutas diferentes que se remontan a los principios de la historia evolutiva de la Tierra. No conocemos muchos detalles de esa historia, pero está claro que las formas más antiguas y primitivas de estas reacciones químicas para recolectar energía, que posiblemente datan de más de 3500 millones de años, no producían absolutamente nada de oxígeno. Los ancestros de esas primeras células todavía viven, y sirven para ilustrar que las modificaciones bioquímicas más profundamente arraigadas eran anaeróbicas, y no requerían ni toleraban el oxígeno.

La investigación de Blankenship y sus colaboradores no sólo revela que existe una amplia gama de estrategias químicas, sino que también apunta a una tendencia de los microbios a combinarse y a intercambiar sus genes recolectores de luz, es decir a apropiarse de las rutas fotosintéticas de sus rivales como si se tratara de secretos industriales. De hecho, el esquema moderno de fotosíntesis que usan casi todas las plantas parece ser una combinación de dos esquemas más primitivos (que se

conocen con los prosaicos nombres de Fotosistema I y Fotosistema II). Gracias a ellos los organismos modernos pueden montarse sobre reacciones biosintéticas complejas y recolectar y usar la luz solar con mucha más eficiencia que sus antecesores que vivieron durante las primeras etapas de la vida en la Tierra.

Más oxígeno

Aunque no hubiera existido la fotosíntesis, la superficie de la Tierra habría experimentado una oxidación pausada (e insignificante) producida por el lento escape de moléculas de hidrógeno hacia el espacio. En lo alto de la atmósfera las moléculas de H_2O son vulnerables a los poderes destructivos de la radiación ultravioleta y los rayos cósmicos, que pueden romper el agua en hidrógeno y oxígeno. Los átomos de agua se reacomodan en otras moléculas simples, sobre todo H_2 y O_2, así como trazas de ozono, O_3. Las moléculas resultantes de hidrógeno H_2 son mucho más ágiles y rápidas que las pesadas moléculas de oxígeno O_2 y O_3, así que pueden escapar al continuo llamado de la gravedad terrestre y volar hacia el vacío del espacio. Así es como, a lo largo de la historia de la Tierra, se han perdido pequeñas cantidades de hidrógeno, lo que a su vez ha producido una acumulación gradual de oxígeno excedente. En la actualidad el proceso continúa: cada año una cantidad de hidrógeno que equivale más o menos a los átomos que contienen unas cuantas albercas olímpicas se fuga hacia el espacio. El mismo proceso ha provocado que Marte, más pequeño y con mucha menos gravedad para contener su hidrógeno, se haya desprendido de mucha de su agua. A lo largo de 4500 millones de años casi todo el hidrógeno de la superficie

de Marte se ha escapado al espacio, y los minerales de hierro cercanos a la superficie se han oxidado para darle al planeta su actual color rojo. Aun así, la cantidad total de oxígeno en la delgada atmósfera de Marte es insignificante: si se condensara en la superficie toda la capa de oxígeno líquido tendría menos de media milésima de centímetro de espesor.

De haber ocurrido durante un periodo tan largo como en Marte, en la Tierra la inexorable producción de oxígeno mediante la pérdida de hidrógeno también habría convertido la superficie en un desierto rojo y oxidado, pero este proceso no pudo tener mucho efecto en el ambiente primitivo de nuestro planeta. Incluso según los cálculos más extremos, menos de una molécula atmosférica en un billón era de O_2 antes de la Gran Oxidación. (Hoy es de uno en cinco). En la superficie de la Tierra esa cantidad insignificante de oxígeno se habría agotado, tan pronto se generara, a manos de las enormes cantidades de átomos de hierro que esperaban ser oxidados en los océanos y en los suelos. Aunque la Tierra hubiera permanecido inerte y eventualmente hubieran aparecido algunas zonas rojizas erosionadas en las partes más viejas y estables de los continentes, este barniz superficial habría sido únicamente cosmético.

También la vida pudo haber contribuido con un poco de oxígeno antes de la fotosíntesis. De hecho, las células han aprendido al menos cuatro formas diferentes de fabricar oxígeno a partir de su entorno. Hoy la más importante es la fotosíntesis oxigénica, pero en épocas anteriores otras rutas bioquímicas pudieron desempeñar un pequeño papel.

La vida obtiene como puede energía de su ambiente. La forma más sencilla de conseguir energía, al tiempo que se libera oxígeno, es comenzar con una molécula que ya es rica en oxígeno y muy reactiva. Así, muchos microbios han aprendido

a explotar moléculas de peróxido (H_2O_2, que se producen en reacciones en lo alto de la atmósfera) para generar O_2 más energía, si bien es cierto que estas especies moleculares deben haber sido escasas antes del aumento del oxígeno atmosférico y que dichos mecanismos microbianos no modificaron demasiado el ambiente temprano de la Tierra.

Hace poco un equipo de microbiólogos reportó en Holanda un escenario más relevante de producción de oxígeno. El equipo descubrió unos microbios extraordinarios que obtienen energía al descomponer óxidos de nitrógeno. Muy temprano en la historia de la Tierra estas sustancias, llamadas NOx, eran producidas en pequeñas cantidades a través de reacciones de nitrógeno gaseoso con minerales, por ejemplo durante las tormentas eléctricas. Hoy, gracias al uso generalizado de fertilizantes ricos en nitrógeno muchos lagos, ríos y estuarios están muy contaminados con compuestos NOx que promueven la aparición de grandes proliferaciones microbianas. Los microbios recién descubiertos son capaces de descomponer los óxidos de nitrógeno en nitrógeno más oxígeno, y luego usar el oxígeno para «quemar» gas natural, o metano, y así aprovechar su energía. Esta brillante estrategia química puede resultar especialmente útil en un mundo rico en nitrógeno y pobre en oxígeno como Marte.

Evidencia fósil

De todos los mecanismos de producción de oxígeno que se conocen la fotosíntesis es el campeón incuestionable, pero ¿cómo comenzó la fotosíntesis y la producción de oxígeno? Los paleontólogos, que estudian los restos tangibles de esos extintos mundos vivientes, pueden ver las conexiones entre la

vida pasada y la presente con más claridad que cualquier otro científico. Tal vez por eso resulte natural que ellos hayan estado entre los primeros que encontraron evidencias de una Tierra oxigenada hace más de dos mil millones de años. En su búsqueda de la primera fotosíntesis los cazadores de fósiles se concentraron, naturalmente, en las rocas más antiguas de la Tierra.

La evidencia fósil de células fotosintéticas muy antiguas es, a lo sumo, fragmentaria. Muy pocos restos microbianos sobreviven miles de millones de años de sepultura, calentamiento y alteraciones químicas. Lo que sobrevive está tan cocido y aplastado que con frecuencia se necesita una imaginación bastante vívida para conseguir darle una interpretación biológica. Con frecuencia las colonias de microbios fósiles tienen el aspecto de unas cuantas manchitas dispersas, de modo que no resulta sorprendente que cada vez que alguien reporta haber encontrado microbios de más de dos mil millones de años de edad las noticias se reciban con un escepticismo cauteloso, o incluso que se ridiculicen abiertamente.

Durante buena parte de las últimas cuatro décadas uno de los defensores más apasionados del rigor paleontológico ha sido J. William (Bill) Schopf, profesor de paleontología en la Universidad de California, campus Los Ángeles. Con base en sus estudios de fósiles microbianos cada vez más antiguos, Schopf ha desarrollado una lista de rasgos que son necesarios y suficientes para confirmar las afirmaciones de que se trata de antiguos seres vivos. Schopf se concentró primero en los especímenes más recientes, mejor conservados y más inequívocos, y es el científico que de forma más convincente ha logrado empujar el registro fósil más y más hacia atrás, hasta hace más de tres mil millones de años, bien entrado en el eón Arqueano.

Los criterios de Schopf son directos y razonables: los microbios fósiles deben provenir de estratos sedimentarios adecuadamente datados y que se hayan depositado en ambientes en los que los microbios hayan podido vivir alguna vez. Los fósiles deben mostrar formas y tamaños uniformes, por ejemplo esferas o conos o cadenas consistentes, y no los manchones y las rayas oscuros y amorfos que pueden encontrarse en muchas rocas antiguas. Schopf y sus estudiantes también usan técnicas estadísticas para eliminar parte de la subjetividad que es inherente al estudio de las rocas sedimentarias más antiguas de la Tierra.

Este catálogo cuantitativo de rasgos esenciales para cualquier muestra de fósiles microbianos le ha funcionado bien a Schopf. Con esto pudo publicar algunas descripciones irrefutables de nuevos hallazgos fósiles, y sembró dudas sobre algunas de las afirmaciones más cuestionables de otros investigadores rivales. Su reto más destacado tuvo lugar en 1996, cuando los científicos de la NASA anunciaron que habían encontrado restos microbianos en un meteorito marciano. Durante una dramática conferencia de prensa organizada por la NASA en agosto de ese año, Schopf era el único disidente. Con un desprecio mal disfrazado, señaló que los «fósiles» marcianos eran demasiado pequeños, carecían de pruebas químicas y mineralógicas a su favor y se encontraban en la clase incorrecta de roca. (A pesar de los convincentes argumentos de Schopf el presidente Clinton elogió el descubrimiento, cosa que tal vez condujo a un significativo aumento en el presupuesto de la NASA para el rubro de astrobiología, y este dinero a su vez terminó apoyando a muchos investigadores del origen de la vida, incluido el mismo Schopf).

Resulta irónico que Schopf pronto fuera víctima del mismo tipo de críticas devastadoras, en relación con una afirmación

que él mismo hizo en 1993, cuando anunció que había descubierto los microbios fósiles más antiguos de la Tierra en el sílex de Apex, una formación de casi 3500 millones de años de edad en el noroeste de Australia. Las fotografías, que muestran unas sugerentes estructuras alargadas con segmentaciones parecidas a las celulares, se veían bastante convincentes. La historia, publicada en un artículo destacado en la revista *Science*, complementó las fotos de los fósiles con dibujos a línea (para «ayudar al ojo») colocadas junto a fotos de cianobacterias, microbios fotosintéticos actuales un poco parecidos a los supuestos fósiles. Schopf incluso afirmó que sus fósiles fueron probablemente productores de oxígeno. En pocos años, sus fotos más convincentes se convirtieron en unas de las imágenes paleontológicas más reproducidas de todos los tiempos, las cuales adornan numerosos libros de texto con leyendas donde se repetía «primeros fósiles», a menudo con la sugerencia de que los microbios eran fotosintéticos.

Una de las reglas de la ciencia es que las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias. También es verdad que las afirmaciones extraordinarias suelen recibir un escrutinio extraordinario. Todos los especímenes fósiles de Schopf se encuentran en el British Museum en Londres, donde están preservados en forma de delgadas láminas transparentes de roca montadas en portaobjetos de cristal y cuidadosamente catalogadas. En 2000 un paleontólogo de Oxford, Martin Brasier, comenzó un cuidadoso examen del material de sílex de Apex y llegó a una conclusión muy diferente.

Las «delgadas secciones» del sílex de Apex recolectadas por Schopf resultaron ser más bien gruesas, al menos en relación con el tamaño de un microbio. Brasier y sus colegas fueron capaces de encontrar la mayor parte de los diminutos objetos que Schopf había fotografiado y publicado, pero les sorpren-

dió darse cuenta de que muchas de las fotografías resultaban, en el mejor de los casos, engañosas. Cada una de las fotos, ya clásicas, de Schopf representa un solo plano focal microscópico: un delgado corte bidimensional de objetos tridimensionales borrosos. Brasier y su equipo usaron una técnica fotográfica más moderna que creó un montaje tridimensional de imágenes y reveló una historia mucho más compleja. Sólo lograban reproducir las fotografías clásicas de los «fósiles» de Apex de Schopf si enfocaban el microscopio a una profundidad particular. Pero si el foco se movía un poco hacia arriba o hacia abajo, lo que al principio parecía una cadena alargada de células microbianas se convertía en una lámina ondulada o un manchón irregular, a veces con pliegues, ramificaciones o líneas irregulares. Según las observaciones de Brasier, las «cadenas de microbios» son secciones transversales de estructuras tridimensionales que tienen poco parecido con cualquier estructura biológica y que fueron elegidas en forma engañosa. El artículo de Brasier y colegas que contenía este vergonzoso desafío, «Questioning the Evidence for Earth's Oldest Fossils» («La evidencia de los fósiles más antiguos de la Tierra en duda») apareció en el número del 7 de marzo de 2002 de la famosa revista *Nature*.

Schopf dio la batalla con su propio artículo, «Laser-Raman Imagery of Earth's Earliest Fossil» («Imágenes de láser Raman de los fósiles más antiguos de la Tierra»), que apareció junto al artículo de Brasier en el mismo número. Schopf y sus colegas presentaron nuevos análisis de los manchones negros, ricos en carbono, del sílex de Apex, y demostraron que tienen composiciones isotópicas y estructuras atómicas consistentes con la biología. Repitió audazmente la retórica de «los fósiles más antiguos», aunque pareció dar marcha atrás en su interpretación de que los microbios eran fotosintéticos. Sin embar-

go, ya se había sembrado la semilla de la duda en las afirmaciones de Schopf, y se había subido el nivel en la búsqueda de las primeras señales de vida.

(En una secuela de última hora, Martin Brasier y sus colaboradores de Australia afirman ahora haber encontrado los «fósiles más antiguos», restos microbianos provenientes de la formación Strelley Pool, de 3400 millones de años de edad, descubierta a 30 kilómetros de los manchones de Schopf, un poco más antiguos pero aún en discusión. Pocos observadores esperan que este suceso sea la última palabra en el debate).

El fósil más pequeño

Imagínate lo que sucede cuando una colonia de microbios muere. Casi siempre las diminutas bolsas de sustancias químicas que alguna vez fueron células vivas se rompen y se dispersan; las biomoléculas grandes se rompen en partes moleculares más pequeñas, sobre todo agua y CO_2. Otros microbios devoran los trozos más suculentos y las moléculas indigeribles se disuelven en los océanos, se evaporan en el aire o quedan atrapadas en las rocas. Por lo general, unos años después nada queda, pues el tiempo no es amable con restos moleculares tan frágiles como éstos.

En circunstancias extraordinarias —si las células muertas son sepultadas muy pronto, si no hay oxígeno corrosivo en los alrededores, si la roca huésped nunca se calienta demasiado— algunas de las biomoléculas más resistentes tienen oportunidad de sobrevivir, si bien en una forma alterada. Las que tienen más posibilidades de sobrevivir son las moléculas con una columna vertebral irregular hecha de hasta 20 átomos de carbono, a veces dispuestos en forma de una larga cadena simple

(con unos cuantos átomos de carbono que asoman por los lados de vez en cuando), a veces en un grupo de anillos entrelazados (parecidos al logo de las Olimpiadas). Estos biofragmentos diagnósticos son como esqueletos ultrapequeños y representan los restos de colecciones mucho más grandes de moléculas funcionales que se han degradado y han perdido todo excepto un núcleo resistente.

Si puedes encontrar uno de estos esqueletos moleculares en una roca sedimentaria antigua, y puedes estar seguro de que no es producto de la contaminación de estratos más jóvenes o de los restos ubicuos de células que murieron recientemente (por ejemplo, de microbios que viven bajo la superficie, o incluso de piel muerta de tus dedos), puedes anunciar que has descubierto un fósil químico, los átomos mismos que alguna vez formaron parte de un microbio vivo. Y esto explica la fascinación de Schopf por los manchones negros en los sílex de Apex.

Muchos paleontólogos moleculares modernos viven una fascinante doble vida. Por un lado pueden escoger los rigores de los geólogos de campo: caminar kilómetros y kilómetros por terrenos difíciles y extraer cientos de kilos de rocas prometedoras de afloramientos lejanos en desiertos ardientes, tundras heladas y altas montañas. Cada año algunos pequeños equipos viajan al occidente de Australia, a Sudáfrica, a Groenlandia y al centro de Canadá en busca de nuevos especímenes. Otros prefieren trabajar en plataformas de perforación, con la esperanza de obtener núcleos de rocas antiguas impolutas, no contaminadas por el clima ni la vegetación. Las expediciones pueden significar meses de adversidades, privaciones y peligros.

Estas aventuras contrastan con los meses de análisis tediosos que se llevan a cabo en laboratorios superlimpios en los

que la más ligera exhalación o huella digital puede contaminar irrevocablemente una invaluable muestra de roca de tres mil millones de años de edad. Para extraer moléculas individuales de una roca se necesita tiempo y paciencia, un cuidado exquisito y un arsenal de aparatos analíticos sofisticados. Uno de los exponentes principales de este arte del siglo XXI es el paleontólogo australiano Roger Summons, que ha instalado su taller en el departamento de la Tierra y las ciencias planetarias del MIT; desde allí dirige el Laboratorio Summons, un comité de expertos conformado por una docena de cazadores de fósiles moleculares que se ocupan de estudiar las rocas más antiguas de la Tierra.

Hace una docena de años, mientras trabajaba en la Universidad Nacional Australiana, Summons dirigió a un grupo de científicos que salieron en la primera plana de los periódicos tras estudiar unos prometedores sedimentos de 2700 millones de años de edad originarios del cratón Pilbara, en el oeste de Australia. Summons y sus colegas tuvieron acceso a un singular núcleo de roca, una secuencia de casi 800 metros de longitud que incluía una intrigante sección de esquisto negro rico en carbono, el tipo de roca sedimentaria que tiene más probabilidades de contener fósiles moleculares. Estas rocas de Pilbara fueron de especial interés porque parecían estar básicamente inalteradas por el calor y no haber tenido contacto con la vida de la superficie o con agua subterránea que las contaminara. Si existía una roca en la que podían sobrevivir antiguas biomoléculas, ésta tenía que ser.

Los investigadores australianos se concentraron en los hopanos, esa elegante categoría de biomoléculas muy resistentes que mencionamos en el capítulo 6. Los hopanos desempeñan un papel importante en la estabilización de las membranas celulares protectoras, y a causa de su rareza fuera de las células

vivas constituyen, tal vez, el más convincente de los biomarcadores moleculares. Cada hopano tiene una característica columna vertebral formada por cinco anillos entrelazados: cuatro hexágonos (cada uno definido por seis átomos de carbono) y un pentágono (con cinco átomos de carbono) al final. Cada anillo comparte dos átomos de carbono con sus vecinos; en total una columna vertebral de 21 átomos de carbono.

Los cuidadosos estudios que se llevaron a cabo en el laboratorio de Summons en Australia produjeron dos artículos muy importantes, ambos publicados en agosto de 1999. El primero, que apareció en *Science* y en el que figura Jochen Brocks, un estudiante de doctorado de Summons, como primer autor, narraba el descubrimiento de hopanos en rocas de 2700 millones de años de antigüedad de Pilbara; estos hopanos serían, así, los fósiles moleculares más antiguos que se conocían, y romperían el récord por más de mil millones de años. Descubrir hopanos puede revelar mucho sobre los ecosistemas antiguos, pues diferentes especies usan varios tipos distintos de hopanos, con átomos de carbono extra pegados en varios lugares alrededor de los anillos. Brocks y sus colegas sugirieron que los hopanos de Pilbara indicaban la presencia de células bastante avanzadas llamadas eucariotas, es decir que contienen un núcleo que alberga el ADN. Cuando se publicó el artículo las células fósiles eucariotas más antiguas que se conocían apenas tenían mil millones de años de antigüedad, mientras que los microbios primitivos que se pensaba que existieron primero, hace unos dos mil millones de años, no tenían un núcleo, así que esta interpretación fue recibida con sorpresa e incluso con abierta incredulidad. Si el descubrimiento era real sólo podían existir dos conclusiones posibles. O bien las células eucariotas aparecieron mucho, mucho antes de lo que se había pensado (y por lo tanto, la evolución de la vida fue más rápida de lo

que se creía) o los hopanos evolucionaron mucho antes que las eucariotas. En cualquier caso tendría que revisarse nuestra comprensión de la historia de la vida.

El segundo artículo, que se publicó en *Nature* con Simmons como autor principal, hacía la afirmación, igual de sorprendente, de que los esquistos negros de 2500 millones de años de edad que se encuentran en Mount McRae, un pico de unos modestos mil metros de altura en el occidente de Australia, contienen una variante de la molécula de cinco anillos del hopano con un carbono extra que asoma a un lado del primer anillo. Estas moléculas 2-metilhopanoides sólo se conocen en cianobacterias fotosintéticas, que son los principales productores de oxígeno de la Tierra. Summons llegó a la conclusión de que hace 2500 millones de años la fotosíntesis ya iba a toda marcha en la Tierra. Esta cronología era consistente con el aumento del oxígeno más o menos por esa época, pero la idea de que el origen de la fotosíntesis pudiera buscarse en unos cuantos fragmentos moleculares preservados le abrió a la paleontología algunas puertas nuevas y emocionantes.

Pero no todos estaban convencidos. Igual que las afirmaciones que hizo antes Bill Schopf sobre los «fósiles más antiguos de la Tierra», los extraordinarios hallazgos de hopanos de Roger Summons han encontrado opositores, entre ellos Jochen Brocks, quien ahora tiene algunas graves dudas sobre su propio trabajo doctoral y sobre cualquier otro estudio acerca de supuestos biomarcadores de más de dos mil millones de años de antigüedad. Los escépticos dicen que los hopanos jóvenes están por todos lados; bajo la superficie hay legiones de microbios que viven en las rocas, así que es inevitable que éstas se contaminen a lo largo de dos mil millones de años de historia terrestre. Es indudable que los hopanos y otras biomoléculas están ahí, pero ¿quién puede asegurar cuándo o cómo llega-

ron? Manténgase en sintonía: siempre es divertido ver estos debates, y casi siempre conducen a nuevos descubrimientos.

Los bancos de arena del tiempo

¿En qué otro lugar podría buscar un paleontólogo? De las muchas pistas relacionadas con la historia de la fotosíntesis que se encuentran en el registro fósil los tapetes microbianos son, al mismo tiempo, las más obvias y las más ignoradas. Actualmente se forman en aguas costeras someras de todo el mundo y a lo largo de las orillas de ríos y arroyos lentos en los que las algas pueden entrelazar sus filamentos en capas gruesas y enmarañadas. Estos resistentes tapetes, similares a una tela, permiten que las algas tengan acceso a un ambiente húmedo e iluminado, y al mismo tiempo que estén protegidas de la inevitable erosión provocada por las inundaciones y las olas. A pesar de que es fácil encontrarlos en todo el mundo, la comunidad paleontológica básicamente ignoró los tapetes microbianos fósiles antes de los descubrimientos de Nora Noffke.

Durante más de una década tuve la oportunidad de trabajar como asistente de Nora Noffke, profesora de geobiología en la Old Dominion University en Norfolk, Virginia, y la principal autoridad en tapetes microbianos antiguos del mundo. Equipada con una mirada muy aguda, una perspectiva única y una determinación de acero, ha decidido realizar su trabajo de campo en algunas de las regiones más intimidantes del mundo. Tras aventurarse en zonas lejanas y hostiles de Sudáfrica, el occidente de Australia, Namibia, los desiertos de Medio Oriente y la helada Groenlandia, ha desenterrado algunas maravillas paleontológicas que a nadie se le había ocurrido bus-

car. Una y otra vez, Nora ha reconocido evidencia de que en muchas de las costas arenosas más antiguas de la Tierra crecieron tapices microbianos.

La razón de que los tapices microbianos fósiles sean tan importantes es que deben surgir gracias a algún tipo de fotosíntesis. Los microbios que dejaron sus restos fragmentarios en sílex negros y esquistos negros pudieron provenir de zonas muy profundas, lejos de la luz solar. Existen evidencias de que los estromatolitos de aguas someras de hace 3500 millones de años mantuvieron un estilo de vida fotosintético, aunque estos pequeños montículos mineralizados también habrían podido ser sencillamente rascacielos protectores en medio de un ambiente hostil y barrido por las olas. Pero los tapices microbianos deben haber sido fotosintéticos. ¿Por qué una colonia de microbios se tomaría la molestia de fijar su residencia en una zona de mareas severas y poco profunda si no para obtener la luz solar?

Para situar las contribuciones de Nora Noffke en contexto, debemos considerar otros fósiles muy antiguos. Durante buena parte del último medio siglo los paleontólogos que buscan las formas de vida más antiguas de la Tierra se han concentrado en tres tipos de formaciones rocosas. Primero los sílex negros, como el controvertido sílex de Apex de Bill Schopf, de 3500 millones de años. Los sílex negros fueron los primeros que alcanzaron los titulares paleontológicos a principios de la década de 1960, cuando el paleobotánico de Harvard Elso Barghoorn reconoció antiguos fósiles microbianos en el sílex de Gunflint del norte de Minnesota y el oeste de Ontario, de 1900 millones de años de edad. Barghoorn estudió secciones muy delgadas y transparentes de la roca, de grano muy fino y rica en silicio, y se dio cuenta de que estaba viendo antiguos cuerpos fósiles de microbios que se habían conservado con ex-

quisito detalle. En colaboración con el geólogo Stanley Tyler, que una década atrás había observado por primera vez unos intrigantes objetos esféricos en el Gunflint, Barghoorn describió algunos grupos sorprendentes de lo que indudablemente eran células, un ecosistema microscópico de esferas, conos y filamentos, algunos en proceso de división. De hecho, a pesar de que durante las décadas siguientes se ha afirmado una y otra vez el descubrimiento de fósiles más antiguos, algunos paleontólogos siguen pensando que el sílex de Gunflint contiene los fósiles de células fotosintéticas incontrovertibles más antiguos de la Tierra.

Un segundo tipo de roca, los esquistos ricos en carbono como los que estudian Roger Summons y sus colegas, son tal vez la mejor fuente de fósiles moleculares antiguos. Los esquistos negros son acumulaciones de lodo y residuos orgánicos que se formaron en aguas profundas, así que podemos saber con certeza que son la sepultura de los restos de antiguos microbios. Es por ello que actualmente se están sometiendo a un cuidadoso escrutinio químico —una capa microscópica tras otra— gruesas secciones de esquistos negros provenientes de Australia, Sudáfrica y otras regiones que tienen miles de millones de años de edad. Conforme surgen nuevas herramientas analíticas más sensibles, algunas capaces de detectar moléculas individuales, sin duda seguirán nuevos descubrimientos.

El tercer tipo de formación que contiene fósiles antiguos y que se estudia intensamente son los estromatolitos, esas estructuras estratificadas y abovedadas hechas de minerales que depositaron poco a poco viejas formas de vida. Si no fuera porque en la actualidad existen algunos estromatolitos que viven en arrecifes de mares someros, los más famosos de los cuales se encuentran en el hermoso y lejano World Heritage Site, en la bahía Shark del occidente de Australia, los paleon-

tólogos seguirían preguntándose cómo se formaron estos pequeños montículos, que suelen encontrarse conservados en piedra caliza. Estos extraños túmulos sedimentarios se forman cuando una cubierta conformada por microbios resbalosos —microbios fotosintéticos, en el caso de los arrecifes actuales— produce capa sobre capa de minerales. Se han identificado cientos de estromatolitos por todo el mundo, algunos en rocas que tienen más de tres mil millones de años de antigüedad.

Los sílex negros, los esquistos negros y los estromatolitos. A esta breve lista de las formaciones fosilíferas más antiguas de la Tierra, Nora Noffke ha añadido un cuarto tipo de roca: la arenisca. Resulta comprensible que las areniscas hayan sido pasadas por alto. La mayor parte de los fósiles se preservan en rocas de grano fino como el sílex o el esquisto, o en arrecifes de caliza, y por ello se hizo énfasis en el sílex negro, el esquisto negro y los estromatolitos. La arena, por el contrario, es relativamente gruesa y contiene granos minerales mucho más grandes que la mayor parte de los microbios. Además, la arena tiende a concentrarse en la playa, en la turbulenta zona de mareas, en donde casi todas las señales de vida son borradas, erosionadas y dispersadas en el mar. Pero Noffke ha pasado dos décadas estudiando las marismas modernas y sus ricos ecosistemas, y ha encontrado que en las costas someras y arenosas crecen tapices microbianos fibrosos y resistentes que contribuyen a darles sus formas características. Estos tapices le imprimen una textura rugosa a la superficie de la arena, muy parecida a la de un mantel arrugado; atrapan granos de sedimento en una masa gruesa y resistente de hebras vegetales; alteran el patrón de las ondas en la arena, y durante las tormentas se rompen en formas geométricas muy particulares y se enrollan como tapetitos persas.

La mayor parte de los afloramientos de arenisca son lisos o ligeramente ondulados, y carecen de cualquier rasgo claramente biológico. Pero en cuanto Noffke aprendió a distinguir las arrugadas y agrietadas superficies, características de los tapices microbianos fosilizados en las rocas antiguas, comenzó a encontrar estos rasgos sutiles dondequiera que volteara. En 1998 identificó las reveladoras texturas rugosas en las superficies de rocas de 480 millones de años en la Montaña Negra, en los Alpes franceses. En 2000, tras mudarse a la Universidad de Harvard para hacer trabajo posdoctoral, hizo retroceder aún más el registro al identificar patrones similares en rocas de Namibia de 550 millones de años de edad. Que existieran tapices microbianos hace 500 millones de años no era particularmente novedoso; todos los paleontólogos concuerdan en que estas estructuras deben haber adornado las regiones costeras mucho antes que eso. Pero antes de Noffke nadie se había tomado el tiempo para estudiar los sistemas de tapices modernos y reconocer los rasgos similares preservados en fósiles indiscutibles en rocas antiguas.

En 2001 Noffke hizo el primero de una serie de descubrimientos revolucionarios de tapetes microbianos en formaciones de más de tres mil millones de años de antigüedad en Sudáfrica y Australia, mucho más antiguas que la hipotética Gran Oxidación. Es difícil distinguir estos rasgos al mediodía, cuando tienes la luz del sol justo sobre la cabeza. Pero en la tarde, cuando se acerca el fin de un largo y con frecuencia infructuoso día de trabajo y el sol brilla oblicuo sobre las piedras desnudas, las distintivas superficies arrugadas de la arenisca se revelan en alto contraste. «Las estructuras parecen saltar por todos lados», recuerda Noffke sobre un descubrimiento particularmente emocionante que se consumó en la última hora del último día de una difícil expedición a África.

Nora se acercó a mí en el 2000 a sugerencia de su mentor de Harvard, el paleontólogo Andy Knoll. Andy y yo habíamos sido amigos desde nuestros días de universitarios, allá por la década de 1970; durante un tiempo nuestras carreras nos condujeron por direcciones científicas diferentes, pero nuestro mutuo interés en la astrobiología nos acercó nuevamente. Knoll se dio cuenta de que los argumentos de Noffke sobre los antiguos tapetes microbianos se basaban casi por completo en rasgos superficiales que, si bien una veces eran sugerentes, en otras requerían un poco de imaginación especulativa. Un paleontólogo promedio que no tuviera la enorme experiencia de Noffke con los tapetes modernos podría pasar por alto o desechar con facilidad las viejas marcas ondeadas o arrugadas en las superficies de las rocas. Así que Knoll la animó a fortalecer su argumento sobre los tapetes añadiendo datos analíticos sobre los minerales, las biomoléculas y los isótopos conservados en sus característicos estratos crenulados. Tal vez algunos rastros de carbono antiguo o ciertas concentraciones de minerales característicos ofrecerían evidencias sólidas sobre algunos de los rasgos más antiguos, aunque ambiguos, de los restos que se sospechaba que podían ser tapices microbianos fósiles. Yo ya había trabajado con otros estudiantes de Knoll, así que me hice cargo.

Los primeros especímenes que mandó Noffke resultaron una buena lección sobre la importancia de ese tipo de análisis. Había encontrado unas delgadas capas onduladas y negras en sedimentos arenosos de tres mil millones de años de antigüedad; de probarse que eran tapices microbianos esto los habría convertido en los más antiguos del mundo. Noffke necesitaba confirmar que estas cosas negras eran ricas en carbono y contenían la firma isotópica adecuada, con aproximadamente tres por ciento menos del pesado isótopo carbono-13 que la corte-

za promedio. Ya había escrito un artículo para *Science* y estaba lista para entregarlo; sólo aguardaba esta última confirmación. Las muestras de roca se enviaron por FedEx, en un envío de alta prioridad, desde Cambridge, Massachusetts, al Laboratorio de Geofísica. Me encontraba bajo la lupa.

Por suerte, mi colega Marilyn Fogel, que es la experta en isótopos de carbono en el Laboratorio de Geofísica del Instituto Carnegie, estaba dispuesta a ayudar. Marilyn vio la muestra y me explicó qué había que hacer: moler la roca y pulverizarla hasta obtener un polvo fino, poner unos cuantos microgramos de ese polvo en varias copitas de papel de aluminio puro, pesar las muestras y doblar cada copa para obtener una esferita del tamaño de un balín. Luego estas muestras y los estándares de los isótopos de carbono se introdujeron, uno a uno, en un horno que evapora los compuestos que contienen carbono para formar gas de dióxido de carbono. El gas fluye hacia un sensible espectrómetro de masas que separa y mide el carbono-12 y el carbono-13. Sólo nos tomó unas horas obtener la proporción que revelaría la verdad.

Nora esperaba que encontráramos algo en el rango de –25 a -35, típico de otros tapices microbianos. Pero la máquina escupió algo diferente. La proporción isotópica estaba cerca de cero, un valor que no tiene nada que ver con la biología y que, por el contrario, era característica del carbono inorgánico, la clase de carbono que fluye desde el manto en los fluidos y se deposita en finas vetas de grafito negro. En resumen: las cosas negras en las muestras de Noffke eran ricas en carbono, pero indudablemente *no* de origen biológico.

Con esa lección en mente, de inmediato nos pusimos a analizar estructuras negras y delgadas en muchos otros antiguos sedimentos que Nora había acumulado en sus varias áreas de trabajo de campo, desde Sudáfrica hasta Groenlandia, pasan-

do por Australia, y que parecían prometedoras. Una y otra vez encontramos que los isótopos de carbono caían en un rango de –30, consistente con los tapices microbianos, y hallamos otras evidencias convincentes de que los microbios florecieron a lo largo de las costas arenosas de la Tierra hace tres mil millones de años. Y a diferencia de las diminutas cositas negras o de algunos rastros de biomoléculas, las evidencias de Noffke estaban a la vista, en el campo, tan grandes como un afloramiento rocoso. Podías sostener sus pruebas en la mano.

Pero sigue en pie una pregunta central: ¿los microbios de los tapetes producían oxígeno o usaban la luz solar para realizar una fotoquímica más simple? Los microbios desarrollaron muchas estrategias para aprovechar el sol, y no todas producen oxígeno. Así que los detalles sobre cómo se ganaban la vida esos organismos dentro de sus tapices hace tres mil millones de años seguirán siendo un tema candente en los años por venir.

La explosión mineralógica

Existe un consenso generalizado sobre la historia de la oxigenación de la Tierra. Antes de cumplir 2500 millones de años de edad la atmósfera de la Tierra carecía casi por completo de O_2. El surgimiento de los microbios fotosintéticos causó dramáticos cambios acumulativos entre 2400 y 2200 millones de años atrás, cuando el oxígeno atmosférico aumentó hasta alcanzar más de uno por ciento de las concentraciones actuales. Este cambio irreversible transformó el ambiente de la superficie de la Tierra y sentó las condiciones para cambios aún más dramáticos.

Como los reportes anteriores demuestran, los detalles de esta transición se han convertido en puntos focales de las carreras de muchos científicos. En los últimos años mi viejo colega Dimitri Sverjensky y yo hemos saltado al ruedo con una afirmación sorprendente y un poco contraintuitiva: la mayor parte de los minerales que existen en la Tierra son consecuencia de la vida. Durante siglos la suposición tácita fue que el reino mineral actúa en forma independiente de la vida. Nuestro nuevo enfoque de la «evolución mineral», por el contrario, subraya la coevolución de la geosfera y la biosfera. Sverjensky y yo proponemos que las dos terceras partes de las aproximadamente 4500 especies minerales conocidas no podrían haberse formado antes de la Gran Oxidación, y que casi toda la enorme diversidad mineral de la Tierra probablemente sería imposible en un mundo sin vida. Desde esta perspectiva, algunos de nuestros minerales favoritos, como la semipreciosa turquesa, la profundamente azul azurita y la brillante malaquita verde son señales inequívocas de vida.

Las razones de que los minerales dependan así del mundo viviente son simples: estos hermosos minerales, y miles de especies más, se forman en la superficie de la corteza gracias a la interacción de aguas ricas en oxígeno con minerales preexistentes. Las aguas bajo la superficie disuelven, transportan, alteran químicamente y modifican de otras formas la primera capa de roca, de unos cuantos miles de metros de espesor. En el proceso ocurren por primera vez nuevas reacciones químicas que producen nuevos conjuntos de minerales. Sverjensky y yo hemos catalogado largas listas de minerales producidos de esta forma, derivados de cobre, uranio, hierro, manganeso, níquel, mercurio, molibdeno y muchos otros elementos. Antes de la aparición del oxígeno estas reacciones formadoras de minerales simplemente no podrían haber ocurrido.

«¿Y qué con Marte, el planeta rojo?», preguntan nuestros colegas. ¿La superficie oxidada de nuestro vecino planetario no es una evidencia de que Marte ha sido oxidado y podría poseer una diversidad mineral similar a la de la Tierra? No, argumentamos nosotros. La diferencia crucial es que Marte, y presumiblemente otros planetas pequeños como él, no experimentaron la circulación dinámica de agua rica en oxígeno *bajo la superficie*, que es lo que produjo la sorprendente diversidad mineral de la Tierra. Es posible que existan depósitos de agua subterránea en Marte, como algunos datos recientes sugieren, pero esa agua está congelada. La única razón de que Marte sea rojo es que ha perdido casi todo el hidrógeno que tenía cerca de la superficie (y por lo tanto, casi toda su agua). Las pequeñas cantidades de oxígeno que se producen por la pérdida de hidrógeno provocan que la superficie sea roja, como si se tratara de una delgada capa de pintura de una fracción de centímetro de espesor, pero ese oxígeno no puede penetrar profundamente en la corteza marciana.

Nuestro nuevo panorama del pasado mineralógico de la Tierra puso en duda algunas ideas anteriores. En un artículo publicado en 2007 en la revista *Science*, con el provocativo título de «A Whiff of Oxigen Before the Great Oxidation Event?» («¿Un olorcillo a oxígeno antes de la Gran Oxidación?») el geoquímico Ariel Anbar y sus colegas documentaron meticulosamente los elementos traza que aparecen en una secuencia de esquisto negro de 2500 millones de años de edad provenientes del monte McRae en el occidente de Australia. Estos sedimentos finamente estratificados, que se depositaron lejos de las costas de un antiguo océano, tienen un aspecto monótono a simple vista, pero en cuanto se los somete a un examen cuidadoso revelan algunas sorpresas químicas. La más notable es una sección de diez metros de largo, cerca de la

parte superior del esquisto, que está notablemente enriquecida en molibdeno y renio, elementos químicos que no suelen aparecer en las rocas sedimentarias a menos que estén oxidadas. En sus formas más oxidadas el molibdeno y el renio se disuelven fácilmente en la roca ígnea que les sirve de huésped, fluyen por los ríos hasta los océanos y pueden incorporarse en esquistos negros en el fondo oceánico.

Todos concuerdan con que estos enriquecimientos de molibdeno y renio nos dicen algo sobre la erosión hace 2500 millones de años. La molibdenita, el mineral más común del molibdeno (y que con frecuencia también incorpora renio) es excepcionalmente suave y se desgasta con gran facilidad. Tal vez en alguna antigua ladera montañosa quedó expuesto granito que contenía molibdenita. Tal vez la erosión mecánica desprendió fragmentos microscópicos de molibdenita que fueron arrastrados hasta el mar y se asentaron en el fondo, negro y lodoso. Estos sedimentos eventualmente fueron sepultados, se solidificaron y dieron origen al esquisto del monte McRae.

Anbar y su equipo llegaron a una conclusión diferente: propusieron que un «olorcillo de oxígeno» proveniente de unas células fotosintéticas precoces fue el agente que se encargó de la maniobra. Tal vez una concentración local de células verdes y resbalosas creó un microambiente con suficiente oxígeno para movilizar el molibdeno y el renio. Después de todo, contamos con pruebas inequívocas de que hace 2400 millones de años el nivel de oxígeno aumentó en forma global, así que ¿por qué no podría haber ocurrido lo mismo, en forma local, cien millones de años antes?

Sverjensky y yo rebatimos que hay muchas formas de transportar el molibdeno, el renio y otros elementos, además del oxígeno. Algunas moléculas atmosféricas comunes que contienen azufre, nitrógeno o carbono podrían haber realizado el

truco de aceptar electrones igual de bien, en ausencia de O_2. Ésta es la naturaleza del debate científico: las ideas y los argumentos nuevos se reciben con ideas y argumentos alternativos.

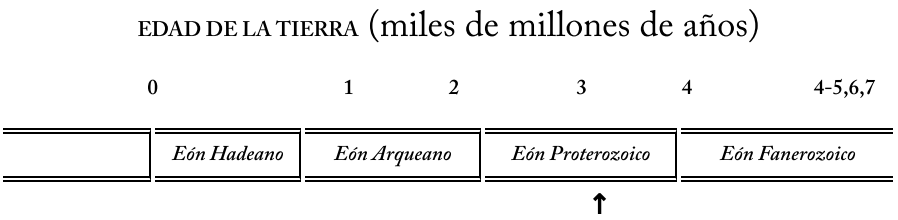
Cualquiera que haya sido el momento exacto del aumento del oxígeno, para cuando la Tierra celebró su cumpleaños 2500 millones su superficie se transformó una vez más. Los primeros cambios dramáticos ocurrieron con la oxidación del suelo. La meteorización de la superficie, ocasionada por el oxígeno, comenzó a descomponer el granito que contenía hierro y el basalto en suelos de color rojo ladrillo. Conforme el suelo envejecía su tono pasó del gris y el negro que predominaban hasta entonces al rojizo color del óxido. Desde el espacio los continentes que poblaban la Tierra hace 2500 millones de años —todavía más pequeños que las masas continentales actuales— se habrían parecido un poco al planeta Marte actual, pero con océanos azules y con remolinos de nubes blancas que ofrecían dramáticos contrastes de color.

Pero el óxido sólo era el más evidente de muchos y profundos cambios mineralógicos. Nuestros últimos modelos químicos sugieren que la Gran Oxidación allanó el camino para que se formaran hasta tres mil especies minerales diferentes, hasta entonces desconocidas en nuestro sistema solar. Sólo después de que la vida aprendiera el truco de fabricar oxígeno pudieron surgir nuevos compuestos químicos de uranio, níquel, cobre, manganeso y mercurio. Muchos de los cristales más hermosos que podemos ver en los museos —minerales de cobre verdeazulados, especies de cobalto púrpura, vetas de uranio amarillo-anaranjadas y otros— nos hablan con elocuencia sobre un vibrante mundo vivo. Es muy poco probable que estos nuevos minerales se formen en un ambiente anóxico, así que

la vida parece ser la responsable, directa o indirecta, de la mayor parte de las 4500 especies minerales conocidas en la Tierra. Resulta extraordinario pensar que algunos de estos nuevos materiales le proporcionaron a la vida en evolución nuevos nichos ecológicos y nuevas fuentes de energía química, y que la vida ha coevolucionado continuamente con las rocas y los minerales.

El oxígeno, ese elemento capaz de llevar a cabo mágicas transformaciones, desempeña el papel estelar en esta interminable historia. Hambrientos de electrones, los átomos de oxígeno reaccionan enérgicamente con toda clase de minerales, y en el proceso erosionan las rocas y forman suelos ricos en nutrientes. Cuando las concentraciones de oxígeno atmosférico se elevaron por primera vez hasta niveles significativos, hace más de dos mil millones de años, todas las formas de vida fotosintéticas vivían en los océanos; las superficies secas estaban completamente desprovistas de vida. Pero el oxígeno allanó el camino para la eventual expansión de la vida a lo largo y ancho del planeta.

Hoy en día nuestra relación con el oxígeno no podría ser más íntima. Con cada respiro una pequeña fracción del aire se vuelve parte de nosotros, y una pequeña fracción de nosotros se convierte en aire. Conforme pasan los días nuestro cuerpo se descompone y se forma nuevamente gracias a innumerables reacciones químicas con oxígeno. Nuestros tejidos se ven remplazados una y otra vez a lo largo de nuestra vida a partir de una provisión finita de átomos, reciclada por el aire, el mar, la tierra y todas las formas vivientes del planeta. La mayor parte de los átomos que formaron tu cuerpo cuando eras niño se han dispersado, y tus átomos actuales también lo harán si es que tienes la suerte de vivir unos cuantos años más en éste, tu hogar planetario rico en oxígeno.



Capítulo 8

Mil millones de años «aburridos»

La revolución mineral

Edad de la Tierra: de 2700 a 3700 millones de años

El geólogo australiano Roger Buick, un enjuto e incansable alborotador de la comunidad de científicos que estudian los orígenes de la Tierra, resumió alguna vez el periodo que se encuentra entre la era Paleoproterozoica (interrumpida por la Gran Oxidación) y la era Neoproterozoica (que vio cómo los glaciares se expandieron y dominaron toda la superficie del globo, y cómo la vida comenzó a evolucionar en direcciones interesantes) con estas severas palabras: «La época más aburrida en la historia de la Tierra parece ser el Mesoproterozoico».

Ésa era tan supuestamente aburrida, los mil millones de años que transcurrieron entre 1850 y 850 millones de años atrás, es el tema de este capítulo. Este enorme intervalo, bautizado el océano intermedio (o con un poco de ironía científica, los «aburridos» mil millones), parece haber sido una época de relativa inmovilidad biológica y geológica. No ocurrieron cambios dramáticos ni transformadores. A primera vista, el registro geológico no revela impactos épicos revolucionarios ni perturbaciones climáticas repentinas. La zona de contacto en-

tre la capa superficial del océano, más oxidada, y las profundidades anóxicas del océano debe haberse vuelto más y más profunda, pero no parecen haber surgido formas de vida fundamentalmente diferentes; tampoco se cree que hayan aparecido muchos nuevos tipos de rocas o de especies minerales. Al menos ésa es la creencia popular.

Pero *aburrido* es una palabra peligrosa. Una vez cometí el error de decir que los lípidos, esa rica y variada clase de moléculas de la vida que incluye las grasas, los aceites y las ceras, eran aburridos. Este comentario, que hice durante una conferencia pública y sin conocer las sutilezas de la química de los lípidos, fue una equivocación doble. En primer lugar los lípidos son asombrosamente diversos: desempeñan toda clase de papeles interesantes en la regulación de las reacciones químicas de la vida y en la fabricación de sus complejas estructuras a escalas nanométricas. Sin ellos la vida como la conocemos sería imposible. La segunda razón de mi error fue que el comentario lo hice, sin saberlo, en presencia de una química muy atenta y carente de sentido del humor que había pasado toda su carrera estudiando los lípidos y que decidió encaminarme por la senda del bien y mandarme pilas de bibliografía muy técnica. Mi penitencia consistió en leer todos estos tomos muy detallados (y algo aburridos).

El punto es que decir que algo es *aburrido* puede hablar más sobre nuestro profundo estado de ignorancia que sobre la insipidez intrínseca del asunto. Los «aburridos» mil millones de años de la Tierra pueden ser, de hecho, análogos a la Edad Media de la civilización humana, ese intervalo dinámico de gran innovación y experimentación, de cambio inexorable e irreversible, el portal al mundo moderno, que alguna vez fue básicamente ignorado por los estudiosos. Nuestra ignorancia autoimpuesta puede además retroalimentarse sola. Los estu-

diantes ambiciosos, que buscan establecer sus reputaciones académicas durante la breve ventana temporal de los estudios de posgrado y las becas de posdoctorado difícilmente deciden dedicarse a una era geológica en la que se piensa que no ha pasado gran cosa.

Pero los estratos geológicos de ésa era enigmática deben contener algunas sorpresas para el investigador astuto. Dentro de las rocas deben permanecer ocultas algunas pistas de transformaciones dramáticas cuyas historias casi no hemos leído. Algunos de los yacimientos más valiosos de la Tierra —vastos depósitos de plomo, zinc y plata de Zambia a Bostwana en África, de Nevada a la Columbia Británica en América del Norte, y de la República Checa al sur de Australia— parecen concentrarse en rocas de esa edad. También en esa época parecen haber florecido otras regiones ricas en minerales exóticos como el berilio, el boro y el uranio. Hay nuevas evidencias que sugieren que durante los mil millones de años «aburridos» los continentes de la Tierra pueden haberse aglomerado en un solo supercontinente gigante, para luego separarse y agruparse nuevamente en el ciclo más majestuoso de la superficie del planeta. Y a lo largo de ese intervalo de mil millones de años muchos microorganismos —conservados hoy como hermosos fósiles— se amontonaban en las costas someras y las aguas profundas. Seguro que tenemos mucho que aprender sobre la edad más oscura de la tierra.

Una historia de cambios

Hasta ahora, unos doscientos millones de años después de su cumpleaños 2500 millones, el cambio dramático ha sido la gran constante en nuestra saga de la evolución de la Tierra. Se

fusionó la nebulosa solar y el Sol se formó. El polvo a su alrededor se aglomeró en forma de cóndrulos. Los cóndrulos se agruparon en planetésimos, y los planetésimos en la proto-Tierra y en otros cuerpos terrestres de miles de kilómetros de diámetro. El impacto de Theia, la posterior formación de la Luna, el océano de magma incandescente que se enfrió para formar una corteza basáltica ennegrecida y picada por miles de volcanes explosivos, el mar ardiente que pronto cubrió casi todas las superficies sólidas de modo que la única tierra seca fue la cima de los volcanes más altos… todos estos acontecimientos dramáticos ocurrieron a lo largo de quinientos millones de años. E incluso durante los dos mil millones de años que siguieron a la acumulación del único océano de la Tierra, la superficie de nuestro planeta experimentó un flujo continuo, pues el granito emergió del basalto fundido y los protocontinentes crecieron sobre las celdas de convección que impulsaron la tectónica de placas.

Fue en este mundo dinámico y cambiante que la vida surgió, evolucionó y eventualmente aprendió a hacer oxígeno. El cambio constante era el sello distintivo de la Tierra. Como si fuera un artista precoz, nuestro planeta se había reinventado a sí mismo una y otra vez, y en cada etapa había intentado algo nuevo.

¿Cómo es posible, entonces, que nuestro dinámico planeta se haya empantanado en un eón de inmovilidad?

La respuesta sencilla es que ni siquiera entonces la Tierra estaba estática. El cambio era incesante, aunque tal vez no tan dramático como el impacto que dio origen a la Luna o la Gran Oxidación. Los mil millones de años «aburridos» fueron testigo de la invención de procesos característicos que formaron nuevos tipos de rocas y yacimientos valiosos, así como de la aparición de muchas especies minerales nuevas. Y lo que es

aún más importante, en todo el mundo existen evidencias geológicas que comienzan a revelar que ésta fue una época de movimientos de placas coordinados y globales que establecerían nuevos patrones que siguen actuando el día de hoy.

El ciclo de los supercontinentes

La geografía de los océanos y continentes de la Tierra, que conocemos tan bien, es bastante efímera, hablando en términos geológicos. América, Europa y África, que rodean el poderoso océano Atlántico; el enorme continente asiático, que se extiende hacia el este; el gran océano Pacífico con su plétora de islas australes y el continente australiano, y el mundo polar de la Antártida, todos son apenas una configuración momentánea. El majestuoso proceso de la tectónica de placas no sólo forma los continentes, sino que los transporta incesantemente a través del globo. La tierra y el agua han sido, una y otra vez, objeto de remodelaciones extremas.

Hay una banda de geocientíficos de élite que han aprendido a desentrañar la antigua y extraña cartografía de nuestro mundo y han producido algunos mapas notables, si bien aproximados, de la Tierra que alguna vez fue y de la que será. Tienen muchas pistas con las que pueden trabajar. Para empezar, sabemos cómo se mueven los continentes actuales; a qué velocidad y en qué dirección. Año con año el Atlántico se ensancha, África se parte en dos y, mientras observamos asombrados, India se estrella contra China y en el proceso abolla la zona de impacto para dar forma a los escarpados Himalayas. Todo sucede en cámara lenta, por supuesto, pero en forma constante, a un ritmo de tres o cuatro centímetros por año; a lo largo de cien millones de años hasta el paso de un caracol puede pro-

ducir cambios monumentales. Si reproducimos una película imaginaria de la geografía de la Tierra hacia adelante y hacia atrás podemos adivinar los rasgos de la caprichosa faz de nuestro planeta. Los ricos registros fósiles de animales y plantas que vivieron hasta quinientos millones de años atrás pueden ayudar a los científicos a elaborar un bosquejo, en especial cuando la flora y la fauna de continentes separados por grandes distancias siguieron caminos evolutivos divergentes. Los diversos marsupiales de Australia, por ejemplo, y las grandes aves no voladoras de Nueva Zelanda cuentan una convincente historia de aislamiento zoológico.

Si nos alejamos más de quinientos millones de años la imagen comienza a desenfocarse y debemos buscar pistas de otro tipo. Una especialmente importante es el magnetismo fósil que se encuentra encerrado en las rocas volcánicas. Tendemos a pensar en el campo magnético de nuestro planeta en términos de una orientación norte-sur, que nos resulta familiar por la alineación de la aguja de la brújula, pero la cosa es más compleja. Las líneas del campo magnético intersecan la superficie de la Tierra en un ángulo, llamado de inclinación magnética o dip. En el Ecuador de la Tierra el dip es cercano a cero —casi horizontal—, pero en latitudes superiores el dip se inclina más y más hasta que es casi vertical en los polos. Si se mide con gran precisión el antiguo campo magnético de la Tierra, congelado en una roca volcánica, se puede descubrir tanto la orientación norte-sur como la latitud de los continentes cuando se solidificaron esas rocas. Estas sutiles evidencias demuestran que, sorprendentemente, algunas rocas que actualmente se encuentran en el Ecuador estuvieron alguna vez cerca de los polos de la Tierra, y viceversa. La evidencia fósil de antiguas lagunas tropicales en la Antártida y de tundra congelada en el África ecuatorial refuerza estos hallazgos. Los

registros de las rocas sedimentarias añaden algunos datos vitales. En diferentes tipos de ambientes se acumulan distintas clases de sedimentos: los mares someros, las plataformas continentales, la tundra, los lagos glaciales, las lagunas de marea y los pantanos contienen tipos característicos de roca.

Armados con estas pistas, algunos expertos en paleogeografía han conseguido armar una imagen coherente y sólida de la Tierra que se remonta a un periodo de al menos 1600 millones de años, ya bien entrado en los mil millones de años «aburridos», y hacer algunas especulaciones informadas que se internan aún más profundamente en el tiempo, hasta la formación de los primeros continentes. En el momento crítico de la subducción, justamente en las fallas en las que las densas losas de la primera corteza basáltica de la Tierra se hundieron en las profundidades del manto, algunas islas compuestas por fragmentos de granito de baja densidad, incapaces de hundirse, se apilaron una sobre otra para formar masas terrestres cada vez más estables y duraderas. Estos antiguos trozos de lo que hoy son los continentes se llaman *cratones*, un término que se deriva de la palabra griega que significa «fuerza».

Los cratones son muy fuertes; una vez que se forman, duran un largo tiempo. La Tierra actual preserva unas tres docenas de cratones más o menos intactos, algunos tal vez de 3800 millones de años de edad y cuyo tamaño oscila entre cien y más de mil kilómetros de largo. Estas piezas, cada una de las cuales recibe un nombre evocador —Esclavo y Superior en América del Norte, Kaapvaal y Zimbabwe en África, Pilbara e Yilgarn en Australia— han experimentado miles de millones de años de migraciones a través del globo. Sobreviven como las piedras fundacionales de los continentes a pesar de haberse juntado y separado una y otra vez, seguidos de muchos fragmentos antiguos de menor tamaño. Tres de estos cratones forman

la mayor parte de Groenlandia, mientras que buena parte del centro de Canadá y las zonas septentrionales de Michigan y Minesota están formados por un grupo de media docena de cratones diferentes. Grandes partes de Brasil y Argentina descansan sobre varios cratones, igual que enormes zonas del norte, oeste y sur de Australia, Siberia, Escandinavia, buena parte de la Antártida, distintas regiones del este y sur de China, casi toda India y varias franjas del oeste, sur y centro de África. Todos estos cratones comenzaron a formarse hace más de tres mil millones de años, una era anterior a la tectónica de placas como la que existe hoy, cuando sólo una pequeña fracción de la superficie del planeta era tierra firme. Y es por ello que todos los cratones contienen un registro valiosísimo —si bien algo distorsionado y revuelto— de la animada adolescencia de la Tierra.

Los cratones son las claves, algo así como las piedras de Rosetta de la historia temprana de la Tierra. Los océanos no pueden ayudarnos a descifrar cómo era la Tierra antigua. Gracias a la incesante cinta transportadora que es la tectónica de placas, que produce nueva corteza basáltica en las dorsales oceánicas y la devora nuevamente en las fronteras convergentes, la corteza oceánica más antigua no tiene más de doscientos millones de años de antigüedad. Cualquier cosa más antigua que eso o bien está preservada en los continentes o ha desaparecido para siempre.

Los cratones peripatéticos tienen una historia sorprendentemente compleja. A lo largo del tiempo, e impulsados por el movimiento de las placas tectónicas, han ido viajando de acá para allá y ocasionalmente han chocado entre sí para formar cratones compuestos y supercratones, que a su vez se aglomeran de vez en cuando en forma de gigantescas masas de tierra: continentes o supercontinentes. Cada colisión produjo una

nueva cadena montañosa a lo largo de la zona de sutura; cada cadena ofrece evidencia convincente de que antiguamente se agregaron grandes superficies.

Los supercontinentes, a su vez, se rompieron y se fragmentaron en islas continentes separadas, delimitadas por el océano. Cada vez que un continente se rompía nacía un océano entre los fragmentos que se alejaban entre sí, y se depositaba un grupo muy característico de sedimentos: primero la arenisca y la caliza propias de las aguas someras; luego lodo y esquistos negros típicos de las aguas profundas. Estas secuencias sedimentarias apuntan a episodios de fragmentación continental. Los continentes se han forjado y se han rasgado una y otra vez. Es un rompecabezas inmenso, que forma una imagen desconocida y cuyas piezas cambian constantemente de forma y de posición.

¿Qué tiene que ver todo esto con los mil millones de años «aburridos»? Todo. Para entender cómo se veían las cosas durante un periodo sin señales ostentosas de actividad —una época sin colisiones y sin árboles, previa a la compleja aparición de la flora y la fauna en el registro geológico— debemos recurrir a los paleogeógrafos. Para poder descifrar los detalles escritos en los cratones, que narran su danza de miles de millones de años alrededor del globo, estos geólogos viajan a las áreas más remotas del planeta, hacen mapas de las rocas, recolectan muestras y las sujetan a una batería de pruebas de laboratorio.

En el núcleo de cada cratón existen rocas muy antiguas, en general de tres mil millones de edad o más. Estas parcelas fragmentarias de la corteza más antigua de la Tierra apenas representan una pequeña proporción de la masa continental

del planeta. Los fragmentos, sin excepción, han sido cocinados por el calor y la presión, alterados por el poder de disolución de las aguas superficiales y deformados a causa de las tensiones de la corteza. Y a pesar de todo con frecuencia puede deducirse si las rocas originales eran intrusiones graníticas o capas sedimentarias. Y de hecho, es una buena noticia que los cratones no sean estáticos: a lo largo de sus historias nuevos pulsos de magma penetran los viejos, y en el proceso forman cuerpos de rocas ígneas en sus venas y cavidades. Tierra adentro, en los lagos y los ríos, se forman nuevos depósitos sedimentarios, y también a lo largo de las costas someras y arenosas. Cuando los cratones chocan o se desgarran —eventos que nos informan sobre los movimientos relativos de las dos masas de tierra— también se forman tipos de rocas y estructuras característicos. Si estas diversas formaciones más jóvenes se estudian con cuidado puede identificarse un conjunto de tipos de rocas que abarcan la historia completa del cratón. Y entonces empieza la diversión.

Las rocas más jóvenes dan pistas sobre la cronología de los movimientos del cratón. Las rocas ígneas contienen diminutos minerales magnéticos que, al solidificarse, se fijan en la orientación del campo magnético de la Tierra. Los estudios paleomagnéticos minuciosos pueden identificar no sólo la orientación de los polos norte y sur en cada momento, sino también la latitud aproximada a la que se encontraban las rocas cuando se enfriaron. Si bien no son exactamente coordenadas de GPS, esos datos registran las posiciones relativas de los cratones a lo largo del tiempo. Las rocas sedimentarias complementan estos datos, pues pueden contener algunas pistas reveladoras sobre el clima y la ecología. Los sedimentos que se depositan en zonas tropicales sujetas a una erosión rápida son notablemente diferentes de aquellas de los lagos templados o de los depósi-

tos glaciales en latitudes superiores. Algunas rocas sedimentarias también incorporan pequeños granos de minerales magnéticos que contienen pistas sobre las posiciones de los polos.

Actualmente hay un ejército de geólogos que estudia intensamente las tres docenas de cratones que se conocen para obtener aunque sea una idea vaga de la superficie cambiante de la Tierra. Está en proceso un cuidadoso trabajo de campo y de laboratorio que durará décadas. Se están integrando datos de todos los rincones del planeta. Y entonces todos los cratones se juntarán como si se tratara de carritos chocones sobre un globo terráqueo, comenzando con lo que sabemos sobre la geografía del planeta moderno, y la película se proyectará lentamente hacia atrás. Mientras más nos alejemos, más borrosa y especulativa será esa película, pero lo que estamos descubriendo es extraordinario. Según las últimas interpretaciones, la Tierra ha experimentado un ciclo de al menos cinco agrupamientos y rompimientos de supercontinentes a lo largo de tal vez tres mil millones de años.

Todavía estamos escribiendo la historia de las primeras masas terrestres del planeta, y alrededor del tema existen no pocas controversias. Nadie se ha atrevido aún a dibujar más que un esbozo de la superficie de la Tierra hace tres mil millones de años, pero hay una hipótesis —que ha estado sometida a mucho escrutinio— que ha bautizado la primera masa terrestre de escala continental con el nombre de Ur; esta estructura se formó hace 3100 millones de años a partir de algunos fragmentos cratónicos dispersos más antiguos, provenientes de lo que hoy es Sudáfrica, Australia, India y Madagascar. (Se ha propuesto una gran masa de Tierra aún más antigua, Vaalbará, que puede haber existido hace 3300 millones de años, pero existen pocas evidencias). Según las comparaciones de los datos paleomagnéticos provenientes de todas estas regiones que

colaboraron para formar Ur, los que hoy son cratones separados estuvieron pegados durante casi toda la historia de la Tierra: sus recorridos globales parecen haber sido virtualmente paralelos, de modo que es posible que estuvieran unidos. De hecho, los datos magnéticos sugieren que el continente de Ur existió durante casi tres mil millones de años y comenzó a separarse hace apenas doscientos millones.

Se cree que el supercontinente más antiguo, bautizado Kenorland o Superia (en honor a áreas de rocas asociadas en el norte de América) se formó hace 2700 millones de años, a partir de Ur y de muchas otras piezas más pequeñas. Cada vez que un cratón chocaba con otro se formaba una zona de sutura y las ciclópeas fuerzas de compresión hacían emerger una nueva cadena montañosa. Muchos de estos rasgos pueden determinarse a partir de rocas de entre 2700 y 2500 millones de años de edad, lo que sugiere un crecimiento secuencial de los supercontinentes. Los datos paleomagnéticos revelan que Kenorland se encontró a poca altura, posiblemente montado sobre el Ecuador, por la mayor parte de su relativamente corta vida.

De la mano de esas primeras extensiones de tierra aparecieron los primeros episodios de erosión a gran escala en nuestro planeta, y los primeros depósitos de sedimentos en las orillas de los océanos someros. La mayor parte de los modelos de la Tierra primitiva proponen que existía una atmósfera muy diferente a la de hoy. El oxígeno estaba totalmente ausente, y los niveles de dióxido de carbono pueden haber sido cientos o miles de veces mayores a los de nuestra época. La lluvia habría consistido en gotas de ácido carbónico que carcomieron la tierra y transformaron las rocas duras en blandas arcillas. Los ríos arrastraron su carga lodosa hasta las pendientes costeras poco profundas de los océanos que rodeaban las superficies te-

rrestres, donde se acumularon gruesas concentraciones de sedimentos suaves en forma de deltas.

Hace unos 2400 millones de años, más o menos al mismo tiempo que comenzó a acumularse oxígeno en la atmósfera, Kenorland experimentó el reverso de la moneda de la formación de supercontinentes. Los datos geomagnéticos revelan que Ur comenzó a separarse de otros cratones y Kenorland comenzó su largo proceso de fragmentación. Esas piezas cratónicas se dispersaron desde el Ecuador en dirección a los polos. Los océanos someros que nacieron entre las piezas que divergían adquirieron gruesos depósitos de sedimentos marinos. El ciclo de los supercontinentes acababa de empezar.

Larga vida a Columbia

Ahora que el ciclo de los supercontinentes ha entrado a formar parte de los anales de la geología los mil millones de años «aburridos» parecen mucho menos «aburridos». El siguiente episodio en la historia de los supercontinentes, mucho más claro que Kenorland gracias a que contamos con grupos de rocas mucho más jóvenes y mejor preservadas, comenzó hace unos dos mil millones de años, en una época en la que la Tierra podía presumir al menos cinco masas de tierra de tamaño continental. La más grande de todas era el cratón Laurenciano, una aglomeración de al menos media docena de cratones de miles de kilómetros de ancho que abarcaban buena parte de lo que hoy es el centro y el este de América del Norte. (Los especialistas en antiguas masas de tierra a veces se refieren a esta agrupación de cratones como las Placas Unidas de América). Ur, el continente original y, tras la ruptura, todavía la segunda masa terrestre en tamaño, siguió decididamente

su camino, ahora separado de Laurencia por un océano de gran tamaño. Los cratones Báltico y Ucraniano, mucho más pequeños y que forman el núcleo de lo que hoy es Europa del Este, y cratones que representan partes de lo que hoy es América del Sur, China y África, también eran islas casi tan grandes como continentes. Cuando la Tierra tenía 1900 millones de años estos grupos de tierras habían chocado en las fronteras de las placas convergentes, sobre las que nacieron nuevas cordilleras y se formó un nuevo supercontinente que recibe los nombres de Columbia, Nena, Nuna o Hudsonlandia o Hudsonia. (El nombre Columbia, que se basa en la convincente evidencia geológica que se encuentra en las cercanías del río Columbia, que bordea la frontera entre Washington y Oregón, parece ser el más usado). Esta enorme tierra yerma, que se calcula que debe haber tenido 13 mil kilómetros de largo de sur a norte y cinco mil kilómetros de ancho, incorporaba casi toda la corteza continental del planeta.

Acomodar los treinta y tantos fragmentos cratónicos para volver a armar un supercontinente extinto supone retos de una complejidad sobrecogedora. No es de sorprender, entonces, que exista más de un modelo que compita para ser aceptado. En el caso de Columbia, en 2002 aparecieron, casi simultáneamente, dos historias bastante diferentes. Por un lado, el geoquímico John Rogers, de la Universidad de Carolina del Norte, y su colega el geólogo indio Santosh Madhava Warrier (de la Universidad Kochi en Japón) propusieron que Laurencia, que hoy es la mayor parte de América del Norte, formaba el núcleo de Columbia. Según Rogers y Santosh el continente Ur se unió a la costa occidental de Laurencia; algunas partes de Siberia, Groenlandia y Báltica se ubicaron en el norte, y partes de lo que hoy es Brasil y el oeste de África se encontraban al sureste. Ese mismo año Guochun Zhao, de la Universi-

dad de Hong Kong, y muchos de sus colegas concibieron una configuración un poco diferente, en la que Báltica está pegada a la costa este de Laurencia, y la Antártida oriental y China están unidas en el oeste. Si se tiene en cuenta la enorme antigüedad de Columbia y la naturaleza preliminar de estas reconstrucciones, ambos equipos científicos concuerdan en buena parte de los datos. Sin embargo podemos anticipar que habrá muchos debates conforme se baraja y se modifica la ubicación de los cratones en las décadas por venir.

En todo caso, el ensamblaje de Columbia, que comenzó hace 1900 millones de años, preparó el camino para los mil millones de años «aburridos». Sin importar cuáles sean los detalles de la configuración del supercontinente Columbia, podemos estar seguros de que buena parte de su interior era un terreno árido y caliente, totalmente carente de vegetación y con grandes extensiones de desiertos herrumbrosos. Desde el espacio, la Tierra se habría visto curiosamente asimétrica, con una gran masa de tierra rojiza rodeada por un superocéano azul aún más grande (y todavía sin nombre). Como todos los continentes estaban concentrados cerca del Ecuador sólo habrían decorado los polos cantidades modestas de hielo. Los niveles de los océanos habrían sido muy altos, tal vez lo suficiente como para invadir algunas regiones costeras con mares interiores someros.

Se supone que Columbia, este supercontinente ecuatorial, es el punto de arranque de la época más aburrida en la historia de la Tierra, pero ¿qué la hace ser así? ¿Qué significa realmente estasis? ¿Qué parámetros eran estables? ¿Era el clima global y la precipitación? ¿Era la naturaleza y la distribución de la vida? ¿Era la composición del océano o de la atmósfera? ¿Qué mediciones se han realizado para establecer esta supuesta esta-

sis? Y, por el otro lado, ¿qué incertidumbres siguen sin respuesta?

Estasis

La mayor parte de los estudiantes de geología simplemente ignora las formaciones rocosas que nacieron de 1850 a 850 millones de años atrás. Entre los cuatro años que les toma obtener un doctorado, tratar de hacer su contribución y obtener un trabajo estable hay muy poco tiempo para ocuparse de una era geológica con una fama tan cuestionable. Pero Linda Kah no era como la mayor parte de los estudiantes. Su mentor en el MIT era John Grotzinger, uno de los líderes en el estudio de las rocas más antiguas de la Tierra, las que tienen más de dos mil millones de años. Su tutor de doctorado en Harvard era Andy Knoll, el famoso paleontólogo que apoyó la investigación de Nora Noffke sobre tapices microbianos. Kah se dio cuenta de que la Tierra hace 1800 millones de años (tal como la describió Grotzinger) era extraordinariamente diferente a la Tierra hace 800 millones de años (como la describió Knoll). Así que tenía que haber ocurrido algo interesante durante los mil millones de años «aburridos», y Kah estaba decidida a determinar qué había sido. Así que se consagró a entender la era Mesoproterozoica, el inmenso lapso de la historia de la Tierra entre 1600 y mil millones de años atrás, una época que comprende casi todos los mil millones de años «aburridos».

Incluso si el Mesoproterozoico resulta ser, en efecto, una época de estasis, mil millones de años de equilibrio ya serían un hecho notable. El cambio es el tema central en la historia de la Tierra. Los océanos y la atmósfera, la superficie y las profundidades, la geosfera y la biosfera son todos aspectos de

nuestro planeta que han cambiado sin cesar a lo largo de los eones. ¿Cómo podría haber experimentado la Tierra mil millones de años sin ningún acontecimiento dramático, sin transiciones importantes en los ambientes de la superficie, sin grandes novedades en el mundo vivo o el inerte? ¿De verdad existió un periodo de mil millones de años en el que todos los sistemas del clima y de la vida coexistieron en un equilibrio perfectamente armonioso? ¿Cómo puede haber pasado algo así?

Durante un tranquilo desayuno cerca del campus de la Universidad de Tennesse, Linda Kah me explica pacientemente las dramáticas y recurrentes transformaciones de la Tierra durante este periodo (así que el Mesoproterozoico no fue para nada aburrido). Viene preparada con una pila de hojas blancas tamaño carta; mientras habla elabora sencillos diagramas explicativos en tinta roja y azul.

«Estas ideas se me ocurrieron hace una década», dice, mientras describe los frutos de su extenuante trabajo de campo en los hostiles terrenos del Mesoproterozoico en el desierto de Mauritania, en el noroeste de África. Le encantaría regresar, pero el aumento en el bandidaje y el secuestro en la región hace que esta excursión de campo sea una empresa problemática, por no decir insensata. En cambio, formará parte del equipo científico del nuevo explorador marciano, una elección más segura.

La historia científica de Kah está consagrada a la tectónica de placas y al caos que provocan en la comprensión del pasado de nuestro planeta: el desplazamiento, choque, ruptura y unión de las masas terrestres ocasiona que la Tierra adquiera un aspecto radicalmente diferente cada tantos cientos de millones de años. Incluso durante el intervalo de 300 millones de años que precedió a los mil millones de años «aburridos» —

cuando el supercontinente Columbia se mantuvo más o menos intacto— la tectónica de placas siguió su rumbo. Uno de los rasgos notables de los supercontinentes es que continúan creciendo poco a poco en las orillas conforme las placas oceánicas se introducen bajo sus márgenes y aparecen nuevos volcanes cerca de las costas. Las extensiones modernas de la costa del noroeste del Pacífico, en la que siguen activos volcanes tan majestuosos como el monte Rainier, el monte Hood y el monte Olimpia, es uno de muchos ejemplos recientes de este fenómeno secular. Y es lo mismo que sucedió con los márgenes de Columbia.

Cuando Columbia comenzó a experimentar rupturas y fragmentaciones para dar lugar a continentes más pequeños y a islas se añadió aún más corteza continental al inventario de la Tierra. Hace unos 1600 millones de años —a comienzos del Mesoproterozoico— la separación del continente Ur del oeste de Laurencia, y del resto de Columbia hacia el este, condujo a un enorme mar intercratónico y a la precipitación de una gigantesca secuencia sedimentaria que alcanzó espesores de más de quince kilómetros. Este depósito heroico, llamado el supergrupo Belt-Purcell, actualmente constituye afloramientos importantes en buena parte del oeste de Canadá y el noroeste de Estados Unidos. Así, aunque los supercontinentes se quebraran y se dividieran, se creaban nuevas rocas continentales a partir de las anteriores.

Esta ruptura de Columbia en dos masas terrestres en separación tuvo otras consecuencias. Laurencia, Ur y los otros continentes seguían estando ubicados más o menos a la altura del Ecuador, lo que significa que todavía no había continentes ni gruesas capas de hielo en los polos y los niveles oceánicos aún eran relativamente altos. De hecho, grandes extensiones de la nueva costa oeste de Laurencia estaban salpicadas por

mares someros; probablemente menos de una cuarta parte de la superficie de la Tierra estaba seca. Durante un lapso de tal vez más de doscientos millones de años el área total de tierra de nuestro planeta se redujo drásticamente, al tiempo que se acumulaban gruesos depósitos sedimentarios en aguas someras de todo el globo, que se han preservado en forma de un revelador registro sedimentario. Que no hubiera hielo también quiere decir que no había glaciares. El intervalo que va de 1600 a 1400 millones de años atrás no tiene ninguno de los restos glaciales característicos —pilas de cantos rodados y peñascos, arena y grava— que se encuentran en casi todas las demás eras geológicas. Así que el aburrido Mesoproterozoico experimentó muchos cambios, aunque esos cambios fueran «normales».

Los supercontinentes se repiten: la formación de Rodinia

Los mil millones de años «aburridos» fueron testigo no de uno sino de dos supercontinentes. Los fragmentos dispersos de Columbia se movieron en direcciones opuestas durante tal vez unos doscientos millones de años, pero hay un límite a la distancia que pueden separarse los continentes, cuando se mueven por el globo, antes de comenzar a juntarse de nuevo. Hace unos 1200 millones de años Ur, Laurencia y otros continentes mesoproterozoicos comenzaron a reensamblarse en una nueva masa de tierra llamada Rodinia (que viene de la palabra rusa que significa «tierra natal o lugar de origen»). El registro geológico de algunas zonas de Europa, Asia y América del Norte, muy distantes entre sí, preserva una serie asociada de eventos formadores de montañas entre 1200 y 1000 millones

de años atrás; cada nueva cordillera se elevó cuando los cratones en convergencia chocaron y se abollaron.

La geografía precisa de Rodinia sigue en discusión, pero los datos geológicos y paleomagnéticos, aunados a la disposición de los cratones en el planeta moderno, limitan seriamente lo que podemos saber. La mayor parte de los modelos ubican todo el supercontinente cerca del Ecuador, con Laurencia —hoy casi toda América del Norte— en el centro, y grandes partes de los otros continentes pegados en el norte, sur, este y oeste. Según varias reconstrucciones, Báltica y algunos pedazos de lo que hoy es Brasil y el este de África yacían hacia el sureste, otros trozos de América del Sur estaban hacia el sur y algunos fragmentos de África hacia el suroeste, si bien todavía no se conocen los detalles de las posiciones relativas de Australia, la Antártida, Siberia y China.

La característica distintiva de Rodinia es la ausencia de ciertos tipos de rocas. A diferencia de cualquier otro intervalo en los últimos tres mil millones de años, se conservan muy pocos depósitos sedimentarios del periodo comprendido entre 1100 y 850 millones de años atrás. Este hiato significa que entre los continentes probablemente no había mares someros del tipo que existían en el supergrupo Belt-Purcell, hace 1600 millones de años. La conclusión: todos estos continentes deben haber embonado muy bien entre sí. Tampoco parece que hubiera grandes mares interiores como los que alguna vez inundaron el centro de América del Norte y sentaron las bases sedimentarias de las Grandes Planicies, hace unos cien millones de años. Según este modelo, la ecuatorial Rodinia tenía un interior caliente, seco y desértico, muy parecido a la Australia actual. Durante casi 250 millones de años el ciclo de rocas sedimentarias parece haberse detenido por completo.

Linda Kah presenta su argumento en forma metódica, pero me queda claro que la apasiona el intervalo geológico que decidió estudiar. A pesar de lo exiguo que es el registro geográfico hacia el final de esta época, el gran intervalo temporal de 1850 a 850 millones de años fue testigo de muchos cambios notables, como consecuencia de la danza cratónica. Durante los mil millones de años «aburridos» se armaron dos supercontinentes, cada uno de los cuales produjo una docena de cordilleras a causa de las colisiones cratónicas. Entre estos dos encuentros de las tierras, conforme el supercontinente Columbia se desintegraba, se depositaron algunas de las secuencias sedimentarias más impresionantes de la Tierra. Buena parte de la tierra estuvo sumergida y luego volvió a ver la luz. Las tasas de sedimentación cambiaron en órdenes de magnitud. Los casquetes polares desaparecieron y volvieron a aparecer. Muchos cambios para un eón «aburrido». Pero hay otra cara de la moneda.

El océano intermedio

Sin importar cuál fuera la geometría exacta del planeta, todo mundo concuerda en que el supercontinente Rodinia debe haberse encontrado rodeado por un superocéano aún más grande, un cuerpo de agua que ha recibido el nombre de Mirovia (por la palabra rusa que significa «global»). Los geoquímicos que estudian el pasado de la Tierra han llegado a la conclusión de que si la era Mesoproterozoica fue en efecto aburrida, Mirovia es la razón principal.

La Gran Oxidación, que distingue el dinámico periodo que va de los 2400 a los 1800 millones de años atrás de cualquier otro en la historia de la Tierra, fue fundamentalmente una

época de cambios en la química atmosférica. La atmósfera de la Tierra pasó de no tener prácticamente nada de oxígeno a tener uno o dos por ciento, un cambio monumental en lo que se refiere al ambiente de la superficie, pero insignificante para los océanos de la Tierra.

La clave se encuentra en las masas relativas. Los océanos contienen más de doscientas cincuenta veces la masa de la atmósfera. Cualquier pequeño cambio en la química de la atmósfera, incluso un incremento de uno por ciento en el oxígeno, tarda mucho tiempo en verse reflejado en los océanos, tal vez tanto como mil millones de años.

Los geoquímicos que buscan entender la historia de los océanos estudian con gran detenimiento un conjunto de elementos químicos y sus isótopos. Hace más de 2400 millones de años los océanos eran ricos en hierro disuelto, un estado que sólo podía mantenerse si la columna de agua estaba completamente desprovista de oxidantes (que habrían causado que los óxidos de hierro se precipitaran) y era pobre en azufre (que pronto habría provocado la formación de pirita y otros minerales de sulfuro de hierro). Con los cambios atmosféricos que trajo la Gran Oxidación parte de ese hierro se eliminó en las aguas someras en forma de óxido de hierro, ya fuera directamente a causa del oxígeno o indirectamente mediante su reacción con productos oxidados de la erosión de la tierra. El oxígeno en la atmósfera también condujo al rápido desgaste y la erosión de minerales que contenían azufre, que fluyó hacia los océanos y consumió aún más hierro. Estos cambios químicos desencadenaron una deposición masiva de formaciones de hierro bandeado (BIF, por sus siglas en inglés), los gruesos sedimentos del fondo oceánico que están conformados por capas y capas de minerales de hierro y que hoy constituyen la mayor parte de los yacimientos de hierro. El proceso de for-

mación de las BIF fue gradual y los océanos contenían mucho hierro, así que la deposición continuó durante otros 600 millones de años. Durante la época de los mil millones de años «aburridos» los océanos seguían siendo anóxicos, pero habían perdido la mayor parte de su hierro disuelto.

Adelantemos la película mil millones de años: las algas fotosintéticas siguen produciendo oxígeno, que comienza a apoderarse de los océanos; hace 600 millones de años la mayor parte de los océanos de la Tierra eran ricos en oxígeno, de la superficie al fondo. Lo que sucedió en medio, el punto crucial de los 1000 millones de años «aburridos», se conoce como el océano intermedio.

En 1998 el geólogo Donald Canfield, de la Universidad del Sur de Dinamarca, propuso que fue el azufre, y no el oxígeno, el que desempeñó el papel principal en el océano intermedio de la Tierra. (Actualmente muchos científicos se refieren al océano del Mesoproterozoico, dominado por el azufre, como el océano Canfield). Su provocadora hipótesis, titulada «A New Model for Proterozoic Ocean Chemistry» («Un nuevo modelo para la química oceánica del Proterozoico») apareció en el número de *Nature* del 3 de diciembre (tras casi un año de retraso a causa de los revisores, que al principio estaban indecisos) y pronto se transformó en la forma en la que muchos de nosotros pensamos acerca de los océanos que existieron en el tiempo profundo.

La idea central es simple. La Gran Oxidación produjo suficiente oxígeno para influir sobre la distribución de muchos elementos «redox-sensibles», entre ellos el hierro, pero no para oxigenar los océanos. Por el otro lado, el aumento en el desgaste y la oxidación en la Tierra introdujo al océano grandes cantidades de sulfatos. Fue así que el océano intermedio se

volvió rico en azufre y pobre en oxígeno y hierro, un estado que continuó durante mil millones de años.

En espera

El registro fósil fortalece la idea de que existió un océano intermedio que cambió muy lentamente. Algunos depósitos de roca de entre dos mil y mil millones de años de antigüedad preservan fósiles microscópicos de una calidad sin precedentes. El sílex de Gunflint, en América del Norte, de 1900 millones de años; la formación Gaoyuzhuang del norte de China, de 1500 millones de años, y la formación Avzyan, de los montes Urales, en Rusia, de 1200 millones de años, contienen diminutos microbios fósiles tan claros y nítidos, algunos en el acto íntimo de dividirse, que se ven idénticos a sus contrapartes modernas. Y sin embargo, este extraordinario avance en la calidad de algunos fósiles sólo refleja que sufrieron menos alteraciones, y no que exista alguna novedad intrínseca en esta época de la Tierra.

Para la vida ese extendido océano intermedio, anóxico y sulfuroso, conllevó buenas y malas noticias. La buena noticia es que los sulfatos constituyeron una excelente fuente de energía para algunos microbios que se ganaban la vida reduciendo el sulfato a sulfuro. Algunas pistas del registro fósil, entre ellas algunos biomarcadores moleculares característicos, datos sobre isótopos del azufre e incluso algunos microbios muy bien preservados en el sílex apuntan a una próspera población costera de bacterias verdes y púrpuras durante el Mesoproterozoico. Estos microbios devoradores de azufre, que todavía existen en algunos entornos anóxicos, producen compuestos orgánicos

del azufre que huelen horrible, como un sistema séptico en el que algo salió terriblemente mal.

A Linda Kah le gusta decir que «el Mesoproterozoico fue la época más apestosa de la Tierra», en referencia a la broma de Roger Buick, que decía que fue la época más aburrida.

—¿En qué momento fue apestosa? —le pregunto.

—Yo creo que fue apestosa todo el tiempo —responde.

Para la vida las malas noticias fueron que dependía del nitrógeno. El nitrógeno gaseoso (N_2) es muy abundante, y constituye el 80 por ciento de la atmósfera actual. El problema es que la bioquímica de la vida no puede usar nitrógeno gaseoso; necesita que se encuentre en su forma reducida, llamada amoniaco (NH_3). Así que la vida ha desarrollado una útil proteína, una enzima llamada nitrogenasa, que convierte el nitrógeno en amoniaco. Pero hay un problema: la enzima nitrogenasa se basa en un grupo de átomos que contienen azufre más un metal, ya sea hierro o molibdeno, ninguno de los cuales existía en el océano intermedio. El hierro había sido eliminado durante la formación de las BIF, así que no era una opción. El molibdeno, por su lado, sólo es soluble en agua rica en oxígeno como la de los océanos actuales. Durante la época anóxica del océano intermedio el molibdeno sólo se encontraba cerca de las costas, en aguas relativamente poco profundas, justamente los entornos en los que se sospecha que pueden haber prosperado esas bacterias devoradoras de azufre.

Y así fue que al trascendental artículo de Canfield le siguió una cascada de publicaciones que vincularon, para el Mesoproterozoico, la geoquímica con la paleontología, dos disciplinas que hace veinte años casi no se hablaban. Las bacterias reductoras de azufre coexistieron con las algas productoras de oxígeno. Durante mil millones de años la vida aguantó en su lugar, pero hubo pocas novedades biológicas.

Y aquí entra la mineralogía, otro campo que, inexplicablemente, durante mucho tiempo ha estado divorciado de la historia global de la Tierra, tan separado de la geoquímica y la paleontología como ambos campos habían permanecido entre sí. Es un sesgo inexplicable, porque todo lo que conocemos sobre el lejano pasado de la Tierra proviene de evidencias que están encerradas en los minerales. Y sin embargo, los mineralogistas casi nunca hablan sobre las edades o la evolución de sus muestras. Por el contrario, durante más de dos siglos la investigación mineralógica se ha concentrado en las propiedades físicas y químicas estáticas. Mi campo de estudio ha estado dominado por investigaciones sobre la dureza y el color, los elementos químicos y los isótopos, la estructura cristalina y la forma externa de los minerales.

Yo también me entregué alguna vez a esta tradición bicentenaria. Durante las dos primeras décadas de mi carrera como investigador aislé cristales diminutos y perfectos de minerales comúnmente presentes en las rocas, los sometí a presiones inimaginables entre dos yunques de diamante, bombardeé las muestras comprimidas con rayos X y medí los sutiles cambios en sus estructuras atómicas. Mis colegas y yo ignorábamos el tiempo geológico y la ubicación geográfica, porque no nos importaba demasiado la edad o la ubicación de nuestras muestras microscópicas. Nos llamábamos a nosotros mismos físicos minerales, y nos aliamos con las ciencias no históricas de la química y la física. ¿Será que incurrimos en el sutil prejuicio contra la simple «narración» geológica?

Esta mentalidad refleja los orígenes que tiene la mineralogía en la minería y la química, y tal vez incluye la convicción subliminal de que los campos de la física y de la química son

más rigurosos que las historias creativas y cualitativas de los geólogos. (Los científicos de la Tierra con frecuencia se preguntan si ese prejuicio tiene alguna relación con el hecho de que haya premios Nobel de física y de química, pero no de geología). Es por ello que pocos mineralogistas se han puesto a pensar sobre los asombrosos cambios que a lo largo de la historia ha experimentado la mineralogía en la superficie de la Tierra.

Cuando varios colegas y yo decidimos publicar en forma conjunta nuestro artículo «Mineral Evolution» («Evolución mineral») en 2008 nuestro objetivo era, en buena medida, desafiar esta perspectiva tradicional y replantear la mineralogía como una ciencia histórica. Nuestra incursión en la historia mineralógica de la Tierra y de otros planetas en nuestro sistema solar y más allá propone que la mineralogía de la Tierra ha evolucionado mediante una secuencia de etapas, cada una de las cuales fue testigo de cambios en la diversidad y la distribución de los minerales. De allí proviene la secuencia narrativa de este libro, en la que los planetas van de la simplicidad a la complejidad mineralógica; de apenas una docena de minerales que flotaban en el polvo y el gas que dieron origen a nuestro sistema solar a las más de 4500 especies minerales que conocemos hoy en la Tierra, dos terceras partes de las cuales no pueden existir en un mundo sin vida.

Se trató de un artículo enormemente técnico que se publicó en la revista arbitrada *American Mineralogist*, que por lo general sólo leen los expertos más especializados. Pero los medios internacionales pronto retomaron la idea de que la vida y los minerales coevolucionaron. *The Economist* y *Der Spiegel*, *Science* y *Nature* y un puñado de revistas de divulgación científica reportaron nuestra especulación sobre la cambiante diversidad mineral de los planetas. *The New Scientist* hasta publicó una

simpática caricatura que muestra cuatro «etapas» de evolución mineral, que van desde un cristal con aletas que nada hasta un cristal «evolucionado» que usa un bastón. Pero de lo que no dio cuenta ninguna de estas publicaciones fue de que nuestras provocadoras ideas eran todas especulaciones. ¿De verdad Marte está limitado a 500 especies minerales? ¿Es cierto que los mundos sin vida difícilmente pueden exceder las 1500 especies? ¿Es verdad que fue necesario un mundo vivo y oxigenado para que se triplicara la diversidad mineralógica de la Tierra? Nosotros presentamos estas afirmaciones como hipótesis, pero aún no comenzaba la odisea de probarlas.

¿Y quién iba a saber por entonces que el mejor lugar para buscar iban a ser precisamente las rocas de los mil millones de años «aburridos»?

Para ponerle un poco de carne cuantitativa a los huesos de la hipótesis de la evolución mineral hay que estudiar grupos individuales de minerales. Por suerte, el mundo contiene expertos en muchos grupos minerales diferentes. Por eso entré en contacto con Ed Grew, un profesor e investigador de ciencias de la Tierra de la Universidad de Maine. Ed es un científico flaco e intenso que ha dedicado su vida a estudiar meticulosamente los minerales que incorporan berilio y boro, elementos raros que en ocasiones se concentran en cristales grandes y hermosos. Conoce los 108 minerales oficiales y aprobados del berilio como si fueran viejos amigos. Cada uno tiene una personalidad; cada uno desempeña un papel geológico. Así que le pedí que pensara en las historias que han vivido a lo largo del tiempo. ¿Cuándo aparecieron? ¿Qué procesos condujeron a que se diversificaran? ¿Alguna vez se ha «extinguido» algún mineral del berilio? Nadie había tratado de respon-

der estas preguntas. Ya es lo suficientemente difícil catalogar todos los minerales de un elemento determinado como para además ocuparse de la titánica tarea de tratar de discernir cuándo apareció o desapareció cada especie. Para el berilo, el mineral de berilio más común (y especialmente apreciado en su variedad de color verde profundo, la esmeralda) existen miles de ubicaciones. Tratar de localizar el berilo más antiguo es una tarea sobrecogedora.

Tras un año de esfuerzos, Ed Grew elaboró una gráfica que muestra el número acumulado de minerales de berilio a lo largo del tiempo, basada en miles de hallazgos reportados. Como era de esperarse, tuvo que pasar mucho tiempo —casi 1500 millones de años— para que hiciera su aparición el primer berilo. El elemento berilio sólo se encuentra en la corteza terrestre en aproximadamente dos partes por millón, así que toma tiempo que los fluidos calientes seleccionen y concentren esos rastros de berilio en un líquido enriquecido que puede precipitar cristales de berilo. Durante los siguientes mil millones de años sólo aparecieron unos veinte minerales de berilio diferentes. Según nuestra joven teoría, durante la Gran Oxidación, de 2400 a 2000 millones de años atrás, debía haber nacido una gran camada de nuevos minerales, pero eso no fue lo que encontró Ed. Por el contrario, el gran incremento ocurrió un poco más tarde, entre 1700 y 1800 millones de años, cuando el número de especies conocidas superó el doble. Este lapso, justo al inicio de los mil millones de años «aburridos», fue la época del ensamblaje del supercontinente Columbia. Tal vez el berilio estaba concentrado en minerales nuevos durante los poderosos eventos de formación de montañas asociados con los choques continentales.

Ed Grew continuó con un estudio aún más impresionante de los 263 minerales conocidos del boro. La turmalina, que es

más apreciada en su hermosísima variante semipreciosa de color rojo verdoso, se encuentra en algunas de las rocas más antiguas de la Tierra, pero durante cerca de 500 a 1000 millones de años eso fue todo. En muestras que tienen 2500 millones de años de edad sólo se encuentran unas míseras veinte especies diferentes de boro, algo menos de 10 por ciento de las que existen hoy. Ed observó que, igual que sucede con los minerales del berilio, en las rocas que pertenecen a los mil millones de años «aburridos» se duplicó el número de especies de boro, esta vez en un intervalo de entre 2100 y 1700 millones de años, intervalo que marca el inicio y el final de la formación del supercontinente Columbia. Ese rápido incremento en la diversidad mineral vuelve a plantear muchas interrogantes, por ejemplo cuándo se disparó en realidad la diversificación postoxidación, cuándo ocurrió el ensamblaje de los supercontinentes y qué provocó tantas novedades mineralógicas durante los mil millones de años «aburridos».

Para nuestra siguiente incursión en la evolución mineral nos ocupamos de los noventa minerales que se conocen del escaso elemento mercurio, un estudio que complica aún más el panorama. Como sucede con el elemento hierro, mucho más abundante, el mercurio puede encontrarse en tres estados químicos: como un metal rico en electrones (el conocido líquido plateado de los viejos termómetros), así como en dos formas oxidadas diferentes. En consecuencia, anticipamos un gran aumento en la diversidad de minerales de mercurio tras la Gran Oxidación, pero el panorama que encontramos fue muy diferente. Como ocurre con la historia de los minerales del berilio y del boro, el mineral de mercurio más antiguo —el que se encuentra más comúnmente en los yacimientos actuales, el brillante mineral rojo llamado cinabrio— tardó más de mil millones de años en aparecer. Le siguieron otras especies que surgieron en

oleadas: una docena de nuevos minerales durante el ensamblaje de Kenorland; más de quinientos millones de años de inmovilidad; otra media docena durante el ensamblaje de Columbia. Resulta evidente que cuando los continentes chocan los episodios de formación de montañas resultantes desatan riadas de fluidos mineralizantes, procesos que a su vez generan nuevos minerales. Sin embargo, resultó una gran sorpresa descubrir que esta mineralización se restringía a los intervalos de formación de supercontinentes.

Y luego vino una sorpresa aún mayor: durante un épico intervalo, entre 1800 y 600 millones de años atrás —un lapso aún más largo que los mil millones de años «aburridos»—, nada. No apareció un solo nuevo mineral de mercurio, ni siquiera durante la época del ensamblaje de Rodinia hace mil millones de años. Actualmente, sospechamos que la culpa la tiene el océano intermedio, cargado de sulfuros. El cinabrio, sulfuro de mercurio, se encuentra entre los minerales menos solubles. Los átomos de mercurio que hubieran sido arrastrados hasta los antiguos mares sulfúricos habrían reaccionado de inmediato con el azufre para formar partículas submicroscópicas de cinabrio que se habrían asentado lentamente en el fondo y habrían impedido cualquier mineralización del mercurio. Sólo en los últimos 600 millones de años, cuando los océanos se volvieron ricos en oxígeno y la Tierra se cubrió de vida, pudo detonarse la población de minerales de mercurio.

Misterios

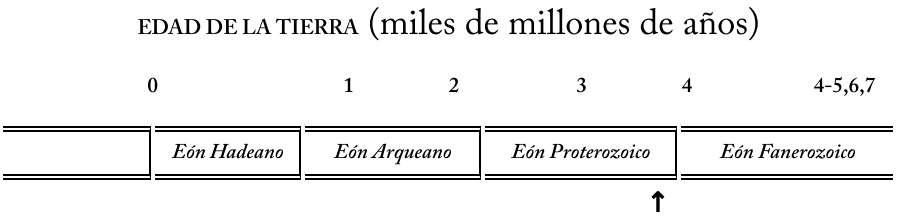
Así las cosas, ¿la explosión de nuevos minerales fue una consecuencia del ciclo de los supercontinentes o uno de los fenómenos característicos de los mil millones de años «aburri-

dos»? ¿O simplemente fue una reacción retardada del aumento del oxígeno? ¿Y qué pasa con el elemento mercurio; de verdad todo dependió del océano rico en azufre? ¿Y qué nuevos resultados inesperados obtendremos al estudiar los otros casi 50 elementos formadores de minerales? Lo que queda claro es que tenemos mucho que aprender, pues apenas empezamos a prestarle atención a las profundas sutilezas de este intervalo de mil millones de años.

Este lapso de entre 1850 y 850 millones años atrás, tan pobremente documentado, también experimentó los procesos de cambio inexorable que han caracterizado todas las etapas de la evolución de nuestro planeta. Hace 850 millones de años el ambiente superficial de la Tierra había cambiado en forma irreversible. Las orillas de los océanos, cada vez más oxigenadas, rebosaban de algas y otros microorganismos, entre ellas las apestosas bacterias devoradoras de azufre, y la Tierra estaba a punto de estallar con vida nueva.

Los no tan aburridos mil millones de años nos enseñan, cuando menos, que la Tierra tiene el potencial de entrar en periodos de inmovilidad, un equilibrio benigno entre sus muchas fuerzas en competencia. La gravedad y el flujo de calor, el azufre y el oxígeno, el agua y la vida pueden encontrar y mantener un equilibrio estable a lo largo de cientos de millones de años. Pero siempre hay un *pero*. Si le das un empujoncito a cualesquiera de estas fuerzas la Tierra vuelve a desequilibrarse, hasta que alcanza un punto crítico cuyas consecuencias son difíciles de predecir, cambios rápidos que pueden trastornar el ambiente superficial en cuestión de unos cuantos años.

Y eso fue justamente lo que pasó después.



Capítulo 9

La Tierra blanca

El ciclo bola de nieve-invernadero

Edad de la Tierra: de 3700 a 4000 millones de años

El eón Proterozoico, que abarca casi la mitad de la historia de la Tierra, comprende entre hace 2500 y hace 542 millones de años. Fue un largo periodo de marcados contrastes. Sus primeros 500 millones de años, más o menos, un periodo de lo más interesante, fueron testigo de la gran proliferación de las algas fotosintéticas y el consiguiente aumento en el oxígeno atmosférico; la transformación de los océanos, alguna vez ricos en hierro, por la precipitación de gigantescas formaciones de hierro bandeado; y la innovación biológica de las células eucariotas, con el ADN contenido en un núcleo, que fueron las precursoras de todas las plantas y los animales.

Los mil millones de años intermedios del Proterozoico —llamados los mil millones de años «aburridos»— fueron una época más parsimoniosa, de cambios constantes y también terriblemente apestosa.

En contraste, los últimos trescientos millones de años fueron tal vez los más dinámicos, pues ocurrieron rompimientos y ensamblajes continentales, cambios climáticos radicales,

transformaciones espectaculares en la química oceánica y atmosférica y el surgimiento de la vida animal.

Espero ya haber establecido que los sistemas de la Tierra están interconectados en formas complejas. El aire, el agua y la tierra nos parecen esferas separadas que cambian a lo largo de escalas de tiempo muy diferentes. El clima cambia todos los días; los océanos cambian a lo largo de miles de años; las rocas tienen ciclos de millones de años y los supercontinentes tardan cientos de millones de años en ensamblarse y romperse. Y sin embargo, todos los sistemas de la Tierra afectan a los demás, en formas tanto obvias como ocultas.

Una casa es una metáfora útil, aunque imperfecta, de nuestro hogar planetario. Cuando estás pensando en comprar una casa quieres saber muchas cosas, por ejemplo cuándo fue construida, así como la edad y la geometría de sus añadidos y renovaciones. Quieres tener detalles sobre los materiales con que se construyó tu casa y la forma en que se instalaron, desde los cimientos hasta el techo. Tienes que averiguar cómo funciona la plomería y de dónde se obtiene el agua, así como los sistemas de ventilación del horno y el aire acondicionado, y sus fuentes de energía. Los compradores astutos también se informan sobre los riesgos potenciales: el fuego y el monóxido de carbono, las termitas y las hormigas carpinteras, el radón y el asbesto, las goteras y el moho. Los geólogos hacen algo parecido: estudian los orígenes y las principales transiciones de la Tierra, la naturaleza de las rocas y los minerales, el movimiento del agua y el aire, las fuentes de energía y los riesgos de las amenazas geológicas.

Las casas también poseen algunos de los comportamientos complejos de la Tierra, pues sus distintos sistemas están interconectados en formas a veces sorprendentes e inesperadas mediante circuitos de retroalimentación negativos y positivos. Si

durante un frío día de invierno la temperatura dentro de la casa cae por debajo de tu nivel de comodidad, el termostato responde encendiendo la estufa, y la temperatura se eleva. Una vez que la casa se entibia, la estufa se apaga. En los calientes días de verano, el aire acondicionado imita esa respuesta al encenderse cuando las temperaturas interiores se vuelven demasiado altas. La Tierra también funciona mediante muchos ciclos de retroalimentación negativos que ayudan al planeta a mantener más o menos estables sus condiciones de temperatura, humedad y composición en la superficie y cerca de ella. Así, por ejemplo, el aumento en la temperatura de los océanos produce más nubes, que reflejan la luz solar hacia el espacio y enfrían los océanos. Del mismo modo, el aumento en las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico provoca calentamiento global, que acelera la erosión de las rocas, y este proceso a su vez consume gradualmente el exceso de dióxido de carbono y provoca un enfriamiento.

A veces las casas también muestran ciclos de retroalimentación «positiva», que pueden acarrear malas consecuencias. Si tu sistema de calefacción falla en un helado día de invierno, las tuberías pueden congelarse y reventar, lo que provoca que tu casa se llene de agua fría y la haga aún más fría e inhabitable. Muchas de las incertidumbres que tienen que ver con el cambio climático de la Tierra se concentran en ciclos de retroalimentación positiva y sus momentos críticos. El aumento en los niveles del mar provocará inundaciones en las costas, que pueden provocar más evaporación y lluvias, lo que a su vez puede ocasionar más inundaciones. El calentamiento de los océanos puede provocar un derretimiento masivo del hielo rico en metano en el suelo oceánico y bajo éste; esto puede provocar un aumento en el gas metano en la atmósfera y provocar aún más calentamiento, que podría liberar aún más metano. Si

queremos comprobar los efectos potencialmente catastróficos de las retroalimentaciones positivas fuera de control no tenemos más que voltear a ver el efecto invernadero desatado en nuestro planeta hermano Venus, con su espesa atmósfera de dióxido de carbono y sus temperaturas superficiales de 500 grados Celsius.

Los mil millones de años «aburridos», en la medida en la que en efecto lo hayan sido, fueron consecuencia de muchas retroalimentaciones negativas eficientes que mantuvieron el cambio bajo control. A pesar de las migraciones globales de tierras y el constante ensamblaje y ruptura de los supercontinentes durante ese largo periodo el clima de la Tierra parece haber sido bastante estable. No hubo grandes glaciaciones. La química del océano, anóxico y rico en azufre, no cambió mucho. La vida tampoco evolucionó en ningún sentido muy novedoso. Aparecieron algunos minerales nuevos, pero no hubo grandes eventos críticos que alteraran el aire, la tierra o el mar.

Todo eso estaba a punto de cambiar con la ruptura de Rodinia.

La ruptura

En contraste con el intervalo que va de 1850 a 850 millones de años atrás, misteriosamente tranquilo, durante los siguientes cientos de millones de años la Tierra experimentó algunas de las fluctuaciones superficiales más rápidas y extremas de su historia. Hace unos 850 millones de años la mayor parte de las masas continentales de la Tierra seguían agrupadas cerca del Ecuador, en el supercontinente Rodinia, totalmente desértico y carente de vida. El inmenso océano de Mirovia, tal vez puntuado por algunas series de islas volcánicas, rodeaba este me-

gacontinente desnudo y oxidado. La atmósfera inhóspita sólo contenía una pequeña fracción de la cantidad actual de oxígeno, demasiado poco para formar una capa protectora de ozono que tuviera alguna utilidad. Un viajero en el tiempo que llevara consigo un buen suministro de oxígeno y algo de bloqueador podría sobrevivir a lo largo de las costas a base de una dieta blanda de algas, pero la vida no habría sido un pícnic en ese desolado mundo del Neoproterozoico.

La desequilibrada yuxtaposición de tierra y mar que era Rodinia no estaba destinada a durar. Durante la mayor parte de la historia de la Tierra el clima ha sido moderado por retroalimentaciones negativas. Por supuesto ha cambiado a lo largo de la historia de la Tierra, pero las fluctuaciones rara vez han alcanzado extremos que pusieran en peligro la vida. Hace 850 millones de años, sin embargo, ocurrieron varios cambios que trastornaron el equilibrio que reinaba antes y empujaron a la Tierra hacia un punto de quiebre climático. El más importante de esos cambios fue el rompimiento gradual de la Rodinia ecuatorial. La primera grieta fue modesta y se abrió hace 850 millones de años, cuando los cratones del Congo y Kalahari (que hoy son parte de África del Sur) comenzaron a separarse hacia el sureste del supercontinente, por lo demás intacto. Hace unos 800 millones de años apareció una segunda grieta que aisló el cratón de África Occidental, que se dirigió al sur de la masa principal. Hace unos 750 millones de años la fragmentación de Rodinia estaba en su apogeo; surgieron enormes cadenas volcánicas y flujos de lava basáltica que revelan que la corteza estaba sufriendo grandes resquebrajaduras. El supercontinente se partió a la mitad; se formó una brecha en dirección norte-sur que separó Ur hacia el oeste y un grupo continental conformado por Laurencia, Báltica, Amazonia y algunos cratones pequeños hacia el este.

Con el agrietamiento se produjeron miles de kilómetros de costas nuevas y las correspondientes oleadas de rápida erosión costera. En los mares intercratónicos se formaron cuencas sedimentarias dinámicas que marcaron el fin de este largo hiato en el registro geológico de la Tierra, ese virtual cese de la deposición de rocas sedimentarias que comenzó en la era Mesoproterozoica y duró casi 250 mil años. En este mundo agitado y fragmentario floreció la vida microbiana. Las tierras erosionadas aportaron nutrientes minerales a las algas fotosintéticas, que durante mucho tiempo habían estado limitadas por las escasas reservas de fosfatos, molibdeno, manganeso y otros elementos esenciales del mar. Los paleontólogos se imaginan una era de zonas de mareas bajas y arenosas, cubiertas por gruesos tapetes de filamentos verdes resbalosos y aguas mar adentro asfixiadas por balsas malolientes formadas por algas.

Los acontecimientos tectónicos también conspiraron para alterar los océanos, la atmósfera y el clima de la tierra. Una de las razones del aumento del oxígeno atmosférico fue la enorme proliferación de algas costeras, pero también que el aumento en la producción de la biomasa de algas condujo a un rápido enterramiento de carbono orgánico. A lo largo de la historia de la Tierra la biomasa, rica en carbono, ha sido un consumidor fundamental de oxígeno. Mientras más biomasa se descomponga, más rápido se consume el oxígeno. (Los incendios forestales constituyen una representación inusualmente rápida de este continuo fenómeno de agotamiento del oxígeno). Del mismo modo, mientras más rápido se entierre la biomasa rica en carbono, más rápidamente se elevan los niveles de oxígeno. Pero ¿cómo podemos saber si la biomasa fue enterrada? Resulta que la caliza, que precipita capas de minerales ricos en carbono sobre el fondo de los océanos someros, preserva un registro sutil pero revelador.

Los isótopos de carbono en la caliza apuntan a cambios en la tasa de producción de algas. Las reacciones químicas esenciales para la vida —la transformación de agua y dióxido de carbono en azúcar durante la fotosíntesis, por ejemplo— siempre concentra carbono-12, más ligero que el carbono-13. De este modo, el carbono en la biomasa (es decir, en las algas, vivas o muertas) siempre es «isotópicamente ligero» si se lo compara con el carbono inorgánico en la caliza. En tiempos normales, cuando florece la vida microbiana y se agota el carbono ligero de los océanos, la caliza exhibe una firma isotópica proporcionalmente pesada. Y en las épocas en las que el enterramiento de biomasa ocurre en forma inusualmente rápida, y conforme más isótopos de carbono ligeros se eliminan sistemáticamente de los océanos, el carbono restante que conforma la caliza es más pesado de lo habitual. Como es de esperarse, la caliza que se depositó a lo largo de las costas de Rodinia hace unos 790 a 740 millones de años es inusualmente pesada. Durante ese intervalo las algas deben haberse expandido y enterrado a un ritmo inédito.

Esta enorme proliferación de vida puede haber tenido un efecto importante en el clima de la Tierra. La vida microbiana consume dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que constantemente es arrojado a la atmósfera a través de los volcanes. Normalmente las entradas y las salidas de CO_2 están equilibradas, así que las concentraciones atmosféricas permanecen relativamente constantes, pero durante las rápidas oleadas de crecimiento de algas en el Neoproterozoico los niveles de dióxido de carbono pueden haber bajado, con lo que se redujo el efecto invernadero.

Existe otro ciclo de retroalimentación relacionado con el CO_2 —y bastante complicado— que también puede haber acentuado el enfriamiento de la Tierra. El agrietamiento de

Rodinia produjo miles de kilómetros de nuevos volcanes en el fondo del mar que fabricaron una corteza oceánica caliente y de baja densidad. Esta corteza caliente y flotante tendía a sostener océanos menos profundos que antes, así que el nivel promedio del mar subió. De aquí se desprende que el periodo que comenzó hace 750 millones de años probablemente vio muchos mares interiores. Los mares interiores significan que hay más evaporación y más precipitación, lo que a su vez produce una erosión más rápida de las rocas expuestas. Pero la erosión de la roca consume dióxido de carbono a gran velocidad, y la reducción de los niveles de CO_2, un gas de efecto invernadero, pueden conducir a su vez a un enfriamiento global.

Las posiciones precisas de los continentes y los océanos justo antes y durante el rompimiento de Rodinia pueden haber desempeñado un papel adicional en la alteración del clima global. Los océanos y la tierra contrastan radicalmente en su albedo: la habilidad de reflejar o absorber la luz solar. Los océanos, más oscuros, tienen un albedo proporcionalmente menor; absorben casi toda la energía del Sol y se calientan en el proceso. La tierra yerma, por el contrario, es mucho más reflectiva. Un supercontinente reseco y desolado como Rodinia habría devuelto buena parte de la luz solar incidente hacia el espacio. Esta combinación de océanos polares y continentes ecuatoriales habría acentuado cualquier fenómeno de enfriamiento global, pues el Ecuador recibe mucha más energía solar que los polos.

Los detalles de tales procesos a escala global y los complejos ciclos de retroalimentación aún se están resolviendo, pero está claro que el Neoproterozoico, después de su largo periodo de relativa estabilidad, estaba preparado para grandes cambios.

Hace 750 millones de años la Tierra entró en un periodo de inestabilidad climática diferente a todo lo que se ha visto antes o después. Y comenzó con una brutal glaciación.

Los glaciares dejan tras de sí un conjunto inequívoco de rasgos sedimentarios, principalmente estratos gruesos e irregulares de rocas diagnósticas llamadas tilitas, que preservan un revoltijo caótico de arena, grava, fragmentos angulares de roca y una delgada harina de roca. Los glaciares también dejan afloramientos redondeados de roca sólida que fueron rasguñados y pulidos por el lento avance de las capas de hielo. Los peñascos errantes y las altas morrenas se suman a las evidencias, y también lo hacen los sedimentos varvados formados por finos estratos que representan las escorrentías estacionales hacia los lagos glaciales.

Los geólogos de campo han descubierto estos rasgos glaciales en rocas de entre 740 y 850 millones de años de edad de todo el mundo y casi en cualquier lugar donde han buscado. De hecho, las evidencias de un cambio climático drástico y abrupto que ocurrió hace unos 740 millones de años se habían estado acumulando por décadas cuando el geólogo Paul Hoffman y tres colegas de las universidades de Harvard y Maryland publicaron, en el número de *Science* del 28 de agosto de 1998, un artículo corto y emocionante titulado «A Neoproterozoic Snowball Earth» («Una Tierra bola de nieve en el Neoproterozoico»). Hoffman y sus colaboradores hicieron el extraordinario salto conceptual de afirmar que al menos dos veces durante ese intervalo la Tierra no sólo experimentó una glaciación sino que se congeló completamente, desde los polos hasta el Ecuador. Sustentaban esta afirmación, en parte, en algunas cuidadosas observaciones de campo de una secuencia de

rocas de la Costa de los Esqueletos en Namibia: gruesos depósitos de tilitas glaciales, de la mano de señales paleomagnéticas de que los glaciares habían estado cerca del Ecuador, a unos 12 grados de latitud. Y no se trataba de glaciares alpinos de las altas montañas; resultaba claro que las tilitas habían sido depositadas en aguas costeras someras, a nivel del mar. Por lo tanto, el clima debe haber sido helado cerca del Ecuador. En contraste, durante la glaciación más reciente de la Tierra los glaciares en crecimiento nunca rebasaron los 45 grados de latitud sur, y la evidencia fósil sugiere la existencia de una zona tropical relativamente templada incluso durante la máxima extensión del hielo. El equipo de Harvard tenía evidencias incontestables de acumulaciones de hielo a nivel del mar, cerca del Ecuador, durante el Neoproterozoico. De aquí el nombre de Tierra bola de nieve.

Para muchos de los científicos que leyeron el artículo de Hoffman en 1998 los isótopos del carbono representaban pruebas inequívocas de este cambio imprevisto y catastrófico. Durante los millones de años que antecedieron al primer hipotético episodio de la Tierra bola de nieve —antes de unos 740 millones de años— el rápido crecimiento de la biomasa de algas había concentrado carbono isotópicamente ligero. Las calizas contemporáneas depositadas en las aguas costeras alrededor del supercontinente Rodinia en fragmentación son proporcionalmente pesadas. Por el otro lado, si la productividad microbiana se desacelera o se detiene los isótopos de carbono en la caliza deben volverse, en promedio, mucho más ligeros. Y eso fue exactamente lo que hallaron Hoffman y sus colegas: una enorme reducción de más de uno por ciento en carbono pesado justo antes y justo después de la aparición de los depósitos glaciales, hace unos 700 millones de años.

El modelo que surgió estaba basado en una serie de ciclos de retroalimentación positiva anidados, cada uno de los cuales condujo a la Tierra a un estado más y más frío. Una de las retroalimentaciones dependía de la erosión continental, un proceso que se aceleró en las zonas tropicales, húmedas y calientes, conforme absorbían más y más dióxido de carbono del aire. Otra realimentación se manifestó en enormes proliferaciones de algas fotosintéticas que tomaron aún más CO_2 del aire. Mientras tanto, conforme el efecto invernadero de la atmósfera de la Tierra se debilitaba y el clima se enfriaba, comenzaron a formarse y a crecer casquetes de hielo en los polos. El hielo y la nieve, blancos y frescos, reflejaron más luz solar hacia el espacio, un ciclo de retroalimentación positiva que enfrió la Tierra aún más rápido que antes. Y aunque las capas de hielo se extendían hacia latitudes cada vez menores, el continente ecuatorial, todavía templado, y su fértil ecosistema de algas siguieron absorbiendo más y más CO_2 de los cielos. El clima de la Tierra, que había sido sacado temporalmente de equilibrio, alcanzó un punto de inflexión cuando el blanco hielo de ambos polos se extendió hacia el Ecuador y tal vez incluso rodeó, eventualmente, el planeta completo. En la versión extrema de este escenario, la «bola de nieve», que es la que propusieron Paul Hoffman y sus colegas, las temperaturas promedio de la Tierra se desplomaron a –45 grados Celsius, y una capa de hielo de hasta un kilómetro y medio de espesor rodeó por completo el globo.

Durante muchos millones de años la Tierra estuvo encerrada en una bola de hielo (o al menos de aguanieve). La blanca Tierra «bola de nieve», incapaz de absorber radiación solar, parecía estar condenada a permanecer para siempre en su capullo helado, porque las temperaturas nunca superaban el punto de congelación. La glaciación global detuvo casi todos

los ecosistemas. La vida microbiana de la Tierra, antes tan abundante, resultó aniquilada. Sólo sobrevivieron algunos microbios resistentes, como lo han hecho durante miles de millones de años, en la oscuridad perpetua de las fuentes hidrotermales en el fondo del mar. Algunas poblaciones aisladas de algas fotosintéticas deben haber sobrevivido en grietas, iluminadas por el sol, que se abrieron en el hielo delgado, o en aguas someras cerca de las tibias laderas de los volcanes.

¿Cómo pudo recuperarse la Tierra de este largo y frío invierno global? La respuesta se encuentra en el agitado interior de nuestro planeta. La blanca cubierta de hielo y nieve no podía detener la tectónica de placas ni frenar las incesantes exhalaciones de gases volcánicos que producían cientos de conos negros que se asomaban entre el hielo. El dióxido de carbono, el principal gas volcánico, comenzó a acumularse una vez más en la atmósfera. Con la Tierra cubierta de hielo, la extracción oportuna de CO_2 que llevaban a cabo tanto la erosión de la roca como la fotosíntesis se detuvo casi por completo. Las concentraciones de dióxido de carbono poco a poco se elevaron hasta niveles que no se habían visto en mil millones de años, y es posible que eventualmente alcanzaran cientos de veces los niveles modernos, lo que desató un nuevo ciclo de retroalimentación positiva: un efecto invernadero descontrolado. La luz solar seguía siendo dispersada por el blanco paisaje, pero el dióxido de carbono hacía rebotar la energía radiante de regreso hacia la superficie, y esto calentaba, inevitablemente, el planeta.

Conforme la atmósfera se calentó algunas zonas de hielo ecuatorial se derritieron por primera vez en muchos millones de años. La tierra oscura que quedó expuesta absorbió más luz

solar y el calentamiento se aceleró. También los océanos comenzaron a deshacerse de su blanca cubierta cuando las retroalimentaciones positivas entre el Sol y la superficie provocaron que la Tierra se calentara más y más.

Un caso de gases

Hoy muchos científicos sospechan que otras retroalimentaciones positivas pudieron exacerbar el rápido calentamiento global, un mecanismo que ciertamente nos preocupa mucho en la actualidad. El metano (CH_4), el hidrocarburo más simple, y que por cierto es el combustible que quemamos en nuestras casas como «gas natural», también es un gas de efecto invernadero, pero uno que es, molécula a molécula, mucho más efectivo para atrapar la energía solar que el dióxido de carbono. Durante miles de millones de años el metano se ha acumulado en los sedimentos del fondo del mar, probablemente gracias a dos mecanismos contrastantes. El primero, que está mucho mejor documentado y que, por lo tanto, es menos controvertido, tiene que ver con microbios que emiten metano como parte de su ciclo metabólico normal. Estos metanógenos prosperan en los sedimentos oceánicos anóxicos que se encuentran cerca de muchas reservas conocidas de metano, así que se piensa que los grandes depósitos de gas natural se formaron gracias a la actividad continua de estos microorganismos.

Algunos experimentos recientes apuntan a una posible segunda fuente de metano, mucho más profunda y que no depende de la biología. Algunos científicos sugieren que en las profundidades de la corteza y la parte superior del manto, a más de ciento cincuenta kilómetros de la superficie, donde

imperan temperaturas y presiones extremas, el agua y el dióxido de carbono pueden reaccionar con minerales comunes de hierro para producir metano. Los experimentos a altas presiones y temperaturas buscan imitar estas hipotéticas reacciones de las profundidades de la Tierra. En un estudio muy citado de 2004, que se realizó en el Laboratorio de Geofísica, el estudiante de posdoctorado Henry Scott mezcló dos ingredientes comunes en la corteza, calcita (carbonato de calcio, el mineral de la calcita que contiene carbono) y óxido de hierro con agua. Scott selló estos ingredientes en un yunque de diamante y calentó la muestra con un láser hasta que alcanzó más de 500 grados, las mismas condiciones extremas que se encuentran en el manto superior. Recuerda que lo más genial del yunque de diamante es que los diamantes son transparentes, así que puedes ver cómo reacciona y se transforma la muestra. Henry Scott observó cómo se formaban diminutas burbujas de metano en la cámara del yunque. El hidrógeno del agua reaccionó con el carbono de la calcita para formar gas natural. Otros experimentos en Rusia, Japón y Canadá han encontrado síntesis parecidas de hidrocarburos bajo una gama de hipotéticas condiciones de las profundidades de la Tierra.

Estos experimentos pueden ser importantes para entender el calentamiento global del Neoproterozoico, pues el metano tal vez contribuyó a una retroalimentación positiva particularmente poderosa. Buena parte del metano almacenado cerca del fondo del mar se encuentra atrapado en un compuesto fascinante llamado clatrato de metano, una mezcla cristalina de agua y gas parecida al hielo que conforma afloramientos en las pendientes continentales. (Este metano helado arde con una llama muy brillante; puedes ver los videos en YouTube). En estos cristales de metano, que se forman cuando el gas que emerge de las profundidades reacciona con la fría agua de mar,

se encuentran encerradas enormes cantidades de metano, según algunos cálculos varias veces las de todas las reservas conocidas combinadas. En el permafrost del Ártico, los suelos en Siberia, el norte de Canadá y otras regiones que han permanecido congeladas durante millones de años también se encuentran encerradas grandes cantidades de metano.

Cuando las aguas de los océanos se calientan aunque sea un poco, lo que provoca que los depósitos de clatrato más superficiales se disuelvan y liberen grandes cantidades de metano a la atmósfera, puede ocurrir una retroalimentación climática positiva extrema. Este metano contribuye significativamente al efecto invernadero, lo que provoca que los océanos se calienten aún más. Algunos científicos apuntan ahora a una posible liberación catastrófica de metano del suelo oceánico durante el Neoproterozoico como un factor que contribuyó a acelerar el calentamiento global que pudo haber hecho pasar la Tierra de fría a caliente en cuestión de unas décadas.

Este escenario del Neoproterozoico depende en gran medida de las fuentes de metano. Si los microbios producen la mayor parte del gas natural de los océanos la producción de clatrato debe haberse frenado durante los episodios de bola de nieve, y la liberación de metano puede no haber desempeñado un papel tan importante en el calentamiento. Si, por el contrario, el manto, a grandes temperaturas y presiones, libera grandes cantidades de metano, las reservas de clatratos de metano se habrían acumulado en forma continua a lo largo de cualquier glaciación, en forma independiente de la vida microbiana, y habrían desatado una retroalimentación mucho más poderosa. Entonces, ¿qué proceso produce el metano, las rocas de las profundidades, los microbios de la superficie o una combinación de ambos?

La cuestión de las profundidades *versus* la superficie para establecer los orígenes del metano puede parecer bastante fácil de solucionar, pero hay un problema que está teñido por una vieja y a veces acalorada controversia internacional en el negocio del gas y del petróleo. El petróleo está formado, básicamente, de moléculas de hidrocarburos, de las cuales el metano es el más simple y el más abundante. En general se da por cierto que los procesos naturales que dieron origen al metano también desempeñaron algún papel en la formación del petróleo.

Uno de los lados del debate es la escuela ruso-ucraniana, fundada a mediados del siglo XIX por el famoso químico ruso Dimitri Mendeléiev, mejor conocido por su ubicua tabla periódica de los elementos. Mendeléiev propuso que el petróleo tiene un origen abiogénico mucho antes de que los experimentos respaldaran sus afirmaciones. «El hecho principal que debe considerarse», escribió, «es que el petróleo nació en las profundidades de la Tierra, y es sólo allí donde debemos buscar su origen». Las ideas de Mendeléiev renacieron en Rusia y en Ucrania durante la segunda mitad del siglo XX, e influyen sobre la próspera industria del petróleo y el gas natural de Rusia. Algunos geoquímicos rusos todavía sostienen que prácticamente todo el petróleo y el gas natural se derivan de fuentes abiogénicas profundas. En su opinión, algunos campos petrolíferos productivos son recursos renovables, que se llenan continuamente a partir de grandes reservas en el manto bajo ellos.

Para la mayor parte de los geólogos petroleros de Estados Unidos estas ideas son heréticas, y citan una letanía de pruebas del origen exclusivamente biológico del petróleo: el petróleo únicamente se encuentra en horizontes sedimentarios en los que alguna vez prosperó la vida; el petróleo está repleto de biomarcadores moleculares característicos; la composición iso-

tópica del petróleo es exclusiva de la vida; los elementos traza también apuntan a una fuente viva. Para muchos geólogos petroleros estadounidenses el caso está cerrado: prácticamente todo el petróleo y el gas natural son biogénicos.

El debate, que se ha polarizado a lo largo de décadas de rivalidades ruso-estadounidenses, revivió en Estados Unidos a manos del brillante, beligerante y ambicioso astrofísico austriaco Thomas (Tommy) Gold, que dio clases en la Universidad Cornell hasta su muerte prematura en 2004. La idea que le trajo fama científica a Gold, al menos dentro de su especialidad, la astrofísica, fue que se dio cuenta de que los pulsos de radio que se detectaban en el espacio profundo con una regularidad metronómica son en realidad estrellas de neutrones que giran a gran velocidad. (Por un tiempo algunos astrónomos pensaron que estas señales de radio podían tener su origen en lejanas tecnologías extraterrestres, de aquí que el nombre astronómico de los pulsares sea LGM, que significa «Little Green Men», hombrecitos verdes).

Aunque Gold incursionó en muchas otras áreas de la ciencia, desde la fisiología de la audición hasta la consistencia de la polvorienta superficie lunar, fuera de la astrofísica su contribución más notable fue defender los orígenes abióticos del petróleo y el gas natural. Él argumentaba que el petróleo parece biológico simplemente porque existe una próspera comunidad de microbios —la «biosfera profunda y caliente»— que usa los hidrocarburos abióticos como alimento. Así, los microbios superponen sus marcadores bioquímicos característicos, los hopanos, los lípidos y otros, a los hidrocarburos abióticos. Con base en esta hipótesis, Gold promovió la búsqueda de hidrocarburos en lugares poco convencionales, como las rocas ígneas y las metamórficas. Hasta convenció a una compañía sueca para que perforara un profundo pozo de exploración en

estas rocas duras, un proyecto que produjo algunos resultados fascinantes pero ambiguos (y que le costó un montón de dinero a varios inversionistas insatisfechos).

Si escuchas con cuidado los argumentos de ambas partes te quedará claro que todavía no se ha respondido la pregunta del origen exacto de los hidrocarburos. Tommy Gold era incansablemente inquisitivo y tenía mucha hambre de respuestas. Poco antes de su muerte inesperada vino a mi laboratorio a darnos una conferencia sobre la biosfera profunda y caliente y a analizar una posible colaboración para llevar a cabo experimentos que podrían haber ayudado a resolver el asunto. El problema crítico del origen del metano sigue sin resolverse, pero esto no quiere decir que sea irresoluble. Lo que necesitamos es un nuevo esfuerzo internacional para comprender el carbono profundo.

El Observatorio de Carbono Profundo

Se puede argumentar que el carbono es el elemento más importante de la Tierra. Es clave para entender el clima y el medio ambiente cambiante de la Tierra, y durante mucho tiempo ha sido, y sigue siendo, el elemento central en nuestra búsqueda de energía. El carbono es también el elemento crucial de la vida y, por extensión, el elemento central para el diseño de nuevas drogas e incontables productos más. Tenemos que entender el carbono, y no sólo en sus ciclos de los océanos, la atmósfera, las rocas y la vida, todos muy estudiados, sino desde la corteza hasta el núcleo.

Así fue que en el verano de 2009 la Fundación Alfred P. Sloan y el Laboratorio de Geofísica inauguraron el Obser-

vatorio de Carbono Profundo (DCO, por sus siglas en inglés), un ambicioso programa de diez años para estudiar el carbono en nuestro planeta, en especial sus papeles químicos y biológicos en las profundidades de la Tierra. ¿Dónde se encuentra el carbono? ¿Cuánto hay? ¿Cómo se mueve, especialmente hacia la superficie y desde ella? ¿Qué tan grande es la biosfera profunda? Este esfuerzo interdisciplinario e internacional ha atraído a cientos de investigadores de docenas de países. Tenemos muchos objetivos, desde finalizar un censo global de la vida microbiana profunda hasta monitorear las emisiones de dióxido de carbono de todos los volcanes activos de la Tierra. Pero el plato fuerte de la misión del DCO es descubrir los orígenes de los hidrocarburos de la Tierra, desde el metano hasta el petróleo. El geoquímico Ed Young y su colega Edwin Schauble, ambos de la Universidad de California en Los Ángeles, creen que los isótopos serán pistas clave para determinar si una filtración de metano en el fondo oceánico fue producida por una roca o por un microbio. Pero sus cálculos teóricos no pueden probarse mediante una medición cualquiera de isótopos pesados *versus* ligeros. Ed Young quiere medir «isotopólogos».

Los isotopólogos son moléculas químicamente idénticas que sólo difieren en la configuración de sus isótopos. El metano, con un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno, viene en una variedad de isotopólogos. Aproximadamente 99.8 por ciento de los átomos de carbono son la variedad más ligera de carbono-12, y uno de cada 500 átomos es el isótopo carbono-13, más pesado. De la misma forma, el hidrógeno viene en una versión más ligera (técnicamente «hidrógeno-1», pero siempre nos referimos a él simplemente como hidrógeno), así como el isótopo hidrógeno-2, más pesado, que siempre se llama deuterio. En la Tierra la típica proporción

hidrógeno-deuterio es de 1000 a 1. Estas proporciones significan que 1 de cada 500 moléculas de metano contienen un isótopo de carbono-13, mientras que más o menos 4 de cada 1000 contienen uno de deuterio.

De por sí es bastante difícil medir trazas de cualquiera de estos dos isótopos pesados, pero eso no es lo que buscan Ed Young y sus colegas: ellos quieren medir los esquivos isotopólogos de metano con doble sustitución, las aproximadamente una en un millón de moléculas de metano que contienen tanto un carbono-13 como un deuterio (indicadas como $^{13}CH_3D$) o bien dos deuterios ($^{12}CH_2D_2$). Según los cálculos de Edwin Schauble, la proporción de estos dos raros isotopólogos en cualquier muestra de metano deberían constituir un indicador muy sensible de la temperatura a la que se formó el metano. La temperatura es clave: si una hornada de metano se formó a temperaturas menores a 100 grados Celsius su origen debe ser microbiano; si se formó a temperaturas superiores a 500 grados Celsius probablemente sea de origen abiótico.

La idea se ve muy bien en papel. El problema es que no existe un instrumento capaz de desentrañar la proporción de $^{13}CH_3D$ a $^{12}CH_2D_2$. Los análisis de isótopos convencionales se basan en la espectrometría de masas, el proceso de separar moléculas según sus masas. Estos dos isotopólogos poseen una diferencia de masa de menos de una diezmilésima, lo que acarrea problemas para distinguir un tipo de otro. Además, los isotopólogos se encuentran en concentraciones extremadamente bajas que desafían los análisis convencionales. Ed Young y sus colegas necesitan un nuevo instrumento que mejore tanto la resolución de la masa como la sensibilidad molecular. Por eso una de las primeras acciones del Observatorio de Carbono Profundo fue ayudar a financiar un prototipo de dos millones de dólares que se diseñó específicamente para

medir las proporciones de los isotopólogos del metano. (La U. S. National Science Foundation, el U. S. Department of Energy, la Shell Oil Corporation y el Instituto Carnegie de Washington también están apoyando este esfuerzo, que constituye un agradable despliegue de cooperación). Esta empresa tiene sus riesgos: va a tomar años construir el instrumento, y más años saber si funciona. Pero vale la pena si nos ayuda a obtener una respuesta definitiva a la pregunta de cuál es el origen de las fuentes de metano profundo y cómo funcionan los ciclos de retroalimentación impulsados por el metano, que tienen la capacidad de cambiar drásticamente el clima de la Tierra.

Ciclos de cambio

De regreso a la Tierra del Neoproterozoico, hacia el final del primer episodio de bola de nieve, hace 700 millones de años, se había alcanzado el punto de inflexión del cambio climático. El aumento inevitable en el dióxido de carbono desempeñó un papel muy importante; la liberación súbita del metano de los clatratos puede haber contribuido también. En un pestañeo geológico —tal vez mucho menos de mil años— el clima comenzó a dar tumbos. La Tierra bola de nieve dio paso a la Tierra invernadero y las temperaturas alcanzaron niveles récord.

Durante mucho tiempo, tal vez treinta millones de años, prevaleció un clima templado, pero el invernadero contenía las semillas de su propia destrucción. Las altas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono descendieron poco a poco. Parte del gas de efecto invernadero fue eliminado por reacciones con rocas. La tierra desnuda, expuesta a lluvias cargadas

de ácido carbónico corrosivo (como consecuencia de los altos niveles de CO_2 atmosférico) se erosionó a gran velocidad. La afluencia de nutrientes minerales, acompañada por la reaparición de la luz solar, condujo a una proliferación explosiva de algas que devoraron el gas de efecto invernadero. Y todos estos acontecimientos están preservados en el registro de los isótopos de carbono.

Así que durante los siguientes ciento cincuenta millones de años la Tierra se meció entre estos dos extremos. El hielo se acumuló y se retiró no una, ni dos, sino al menos tres veces, y el clima global dio pasos erráticos desde el ártico hasta el trópico y de regreso. El primer episodio, llamado la glaciación Sturtiana, alcanzó su máximo hace unos 720 millones de años. La glaciación Marinoana la siguió hace 650 millones de años, y la glaciación Gaskiers, menos severa, ocurrió hace 580 millones de años. La gruesa acumulación de rocas que puede verse en una docena de países revela detalles de este dramático ciclo. Conforme el hielo se retiraba los glaciares dejaban tras de sí enormes montones de peñascos desgajados y rocas molidas, tilitas grumosas y cantos redondeados y pulidos. Pronto estas capas de tilita fueron cubiertas por gruesos depósitos cristalinos de minerales de carbonato, otro signo revelador de que los océanos se estaban calentando. Los carbonatos se formaron tan rápido en los océanos supersaturados de CO_2 que el fondo del mar se cubrió de cristales gigantes, de varios metros de largo. Estos restos apresurados nos hablan de una época en la que la torturada superficie de la Tierra perdió su equilibrio químico y abandonó para siempre sus mil millones de años de inmovilidad.

Tras la publicación de Paul Hoffman sobre la Tierra bola de nieve, en 1998, los geólogos adoptaron por un tiempo el escenario del planeta congelado, pero actualmente el romance está

llegando a su fin. A quienes hacen modelos climáticos les ha costado trabajo cubrir toda la superficie de la Tierra con hielo, pues sus cálculos sugieren que incluso en épocas de enorme enfriamiento el Ecuador debió permanecer templado. Los geólogos de campo están encontrando evidencias de hielo en movimiento, olas superficiales y corrientes oceánicas durante el momento de máximo congelamiento, señales de que existieron algunas aguas abiertas. Para la mayor parte de los geólogos la dura bola de nieve ha sido remplazada por un escenario más benigno, la «bola de aguanieve», el siguiente modelo a vencer. Hoffman lo rebate con el argumento de que la aguanieve podría representar condiciones que existieron justo antes o justo después del máximo glacial.

¿Cómo podríamos determinar la diferencia? Una interesante línea de evidencia que respalda la bola de nieve dura es una breve y sorprendente oleada de formaciones de hierro bandeado que se depositaron más o menos al mismo tiempo que se piensa que el hielo puede haber cubierto el globo. Resulta difícil explicar la formación de estos depósitos, pues los océanos habían sido despojados de su hierro más de mil millones de años antes, cuando no habían comenzado los mil millones de años «aburridos». Entonces, ¿cómo pueden haberse recargado de hierro los océanos? Un modelo sugiere que el episodio de la bola de nieve selló el océano y privó completamente de oxígeno a la columna de agua de mar. Mientras tanto, las fuentes hidrotermales del fondo del mar continuaron bombeando hierro fresco desde el manto hacia las profundidades del océano. Poco a poco se elevaron las concentraciones de hierro que, en cuanto terminaron los episodios glaciales, rápidamente se depositaron como nuevas formaciones de hierro bandeado.

Bola de nieve *versus* bola de aguanieve: estas controversias no son nada nuevo para la ciencia, y ésta en particular se ha

mantenido bastante discreta y más amigable que otras. Paul Hoffman se retiró y una nueva generación se ha apropiado de este desafío, pues las respuestas aún yacen ocultas en las rocas.

El misterio del hielo

Aún queda un gran misterio por resolver. Los episodios de la Tierra de bola de nieve/bola de aguanieve no fueron para nada los primeros periodos de glaciación de la Tierra, ni los últimos, pero los tres grandes intervalos del Neoproterozoico contrastan con los demás. Hasta donde sabemos nunca, ni antes ni después, ocurrió una oleada de frío tan extrema en la Tierra. ¿Por qué es así? ¿Por qué un breve periodo de la historia de la Tierra fue tan diferente a todos los demás?

Resulta evidente que dos periodos anteriores de glaciaciones, ambos bien preservados en el registro geológico, fueron mucho menos severos. El avance del hielo más antiguo que se conoce, un evento relativamente breve que revelan los depósitos de tilita en antiguos cratones sudafricanos, ocurrió hace unos 2900 millones de años, a mediados del eón Arqueano. Resulta un misterio que haya tardado tanto que los casquetes de hielo de la Tierra se expandieran desde los polos; antes el Sol era mucho menos intenso; durante los primeros cientos de millones de años su radiancia era de 70 por ciento de la actual, y no pasó de 80 por ciento durante la glaciación de mediados del Arqueano. Con tan poca energía proveniente del Sol deben haber estado en operación otros mecanismos de calentamiento. Muchos científicos apuntan a niveles mucho más altos de gases de efecto invernadero —dióxido de carbono, metano y una neblina anaranjada compuesta por hidrocarburos —, como el principal sospechoso de ejercer una influencia

moderadora. También deben haber desempeñado un papel en la moderación del clima los flujos de calor que provenían del turbulento interior de la Tierra y las exhalaciones volcánicas, ambos mayores que en la actualidad.

Resulta irónico que el primer episodio glacial de la Tierra pueda haber sido producto de un exceso de gases de efecto invernadero. Si el contenido de metano de la atmósfera se elevó, las reacciones en lo alto de la estratósfera habrían producido más y más grandes moléculas de hidrocarburos que habrían dotado a la Tierra de un brumoso cielo anaranjado. Si esa niebla se hubiera hecho demasiado espesa parte de la energía del Sol habría sido bloqueada y la Tierra se habría enfriado.

Al rompimiento del supercontinente ecuatorial Kenorland, hace unos 2400 o 2200 millones de años, le siguió un segundo y más largo episodio de enfriamiento, marcado por enormes depósitos glaciales. Los modelos atmosféricos sugieren que la creciente erosión y deposición de sedimentos a lo largo de las flamantes costas devoró buena parte del dióxido de carbono que existía en ese momento. Al mismo tiempo, el aumento en el oxígeno presagiaba la desaparición del metano atmosférico, el otro gas de efecto invernadero importante. El tenue Sol (tal vez al 85 por ciento de los niveles modernos) no era suficiente para mantener un invernadero tan eficiente, así que comenzó un largo periodo de frío.

No se ha encontrado ningún rastro de glaciación para los siguientes 1400 millones de años —casi una tercera parte de la historia de la Tierra, incluyendo los mil millones de años «aburridos»—. El clima de la Tierra parece haberse conservado en un equilibrio notable, ni muy caliente ni muy frío. Para explicar una época tan larga de cambios restringidos podemos invocar una letanía de posibles ciclos de retroalimentación negativa, todos los cuales pueden haber contribuido a la estasis,

pero es difícil precisar la causa cuando no existe ningún efecto evidente. De lo que sí podemos estar seguros es de que la Tierra alcanzó un momento crítico hace unos 740 millones de años al que siguió el ciclo de la bola de nieve e invernadero.

La segunda Gran Oxidación

El mundo viviente no es insensible a estos cambios globales extremos; durante al menos los últimos 3500 millones de años los cambios en la geosfera han afectado profundamente la biosfera. Cuando la Tierra se debatía entre sus extremos más calientes y más fríos las costas continentales, expuestas y erosionadas, contribuían a los ecosistemas costeros con sucesivas oleadas de nutrientes esenciales. El manganeso, esencial para la fotosíntesis, era uno de estos minerales vitales. El molibdeno (que se usa para procesar el nitrógeno) y el hierro (que se emplea en varios procesos metabólicos) también eran suministrados en abundancia. Pero de todos los elementos químicos el fósforo bien puede haber sido el más importante en los mares del Neoproterozoico. El fósforo es esencial para todas las formas de vida. Ayuda a formar la columna vertebral de las moléculas genéticas ADN y ARN, estabiliza muchas membranas celulares y desempeña un papel central en el almacenamiento y la transferencia de energía química en cada célula.

La historia del fósforo le fascina a Dominic Papineau, un colega que hizo su trabajo posdoctoral en el Laboratorio de Geofísica. El amable acento de Papineau no tarda en revelar sus raíces canadienses francesas; su pasión por las formaciones más antiguas de la Tierra resulta evidente en cada esquina de su oficina del Boston College, rebosante de rocas. Los trozos pulidos de estromatolitos y de formaciones de hierro bandea-

do son testigos de sus muchas áreas de trabajo de campo en lugares remotos.

Papineau se dio cuenta de que la tasa de crecimiento de algunos ecosistemas está directamente relacionada con la cantidad de fósforo disponible. Se imagina una época en la que una cantidad inédita de nutrientes fluía hacia los mares costeros poco profundos del Neoproterozoico. Algunos de los depósitos de fósforo más grandes del mundo —sedimentos que se depositaron en forma de células ricas en fósforo que murieron y se asentaron en el fondo— están concentrados en los mismos intervalos de tiempo que los ciclos de bola de nieve e invernadero. Papineau ha viajado por todo el mundo —el norte de Canadá, Finlandia, África e India— en busca de estos antiguos estratos de fosforita para estudiar sus entornos geológicos distintivos y sus fascinantes características químicas.

Las proliferaciones de algas provocadas por el fósforo llevaron el oxígeno atmosférico a nuevos niveles, tal vez incluso a concentraciones respirables de 15 por ciento. Pero, paradójicamente, las aglomeraciones de algas en descomposición que se depositaban en el fondo del mar habrían reaccionado rápidamente con el oxígeno de la columna de agua y habrían devuelto los océanos a un estado anóxico letal. Así, el resurgimiento de la vida tras la Tierra bola de nieve bien puede haber conducido a un océano estratificado, con una capa rica en oxígeno en la superficie y aguas anóxicas por debajo. Dominic Papineau también ve fuertes paralelismos con las zonas costeras actuales, en las que grandes oleadas de fosfatos provenientes de las descargas de fertilizantes pueden estimular las proliferaciones de algas y zonas anóxicas en las aguas profundas.

Y esto nos trae de vuelta a uno de los principios centrales de la evolución mineral: la coevolución de la geosfera y la biosfera. Los minerales cambian la vida, y la vida cambia los

minerales. Cuando comencé la maestría en Ciencias de la Tierra, hace cuatro décadas, la biología parecía ser totalmente irrelevante para la geología. Se pensaba que el gran ciclo de las rocas estaba separado de los ciclos de la vida. Cuando le pregunté a mi asesor de tesis si debía tomar un curso de biología como mi última materia optativa, me persuadió de tomar en su lugar un curso de mecánica cuántica. «Nunca vas a usar la biología», me aseguró.

Fue un consejo de dudosa utilidad, en especial si consideramos que en todas las etapas de la evolución de la Tierra, del origen de la vida en adelante, los seres vivos han influido en la geología y la geología en los seres vivos. En 2006 el geoquímico Martin Kennedy, de la Universidad de California, campus Riverside, y cuatro coautores, propusieron un ejemplo novedoso, aunque especulativo, de esta codependencia. Su artículo, «The Inception of the Clay Mineral Factory» («Los inicios de la fábrica de minerales de la arcilla»), apareció en el número del 10 de marzo de la revista *Science*. Según su ingeniosa tesis, el aumento en el nivel de oxígeno atmosférico, desde una fracción hasta sus niveles presentes, fue acelerado por retroalimentaciones positivas entre los microbios y los minerales de la arcilla.

La arcilla está compuesta básicamente de fragmentos minerales microscópicos de grano ultrafino que absorben agua y forman masas viscosas y pegajosas. Si alguna vez se te ha quedado atrapado un pie o una llanta en un charco profundo de arcilla húmeda, posiblemente es una experiencia que nunca olvidarás. Los minerales de la arcilla se forman principalmente por erosión, especialmente la que ocurre a causa de alteraciones químicas producto de condiciones húmedas y ácidas como las de finales del Neoproterozoico. Kennedy y sus colegas sugirieron que la rápida erosión posglacial de los conti-

nentes produjo muchos más minerales de la arcilla que antes de los tres grandes ciclos de bola de nieve e invernadero. Es más, cada vez tenemos más evidencias de que las colonias microbianas comenzaron a colonizar el paisaje costero más o menos por esta época, y los microbios pueden ser especialmente eficientes para transformar la dura roca en blandas arcillas.

Una de las propiedades más sorprendentes de los minerales de la arcillas es su habilidad de unirse a biomoléculas orgánicas. Un aumento en la producción de minerales de la arcilla habría retirado biomasa rica en carbono, y conforme los minerales de la arcilla alcanzaron los océanos habrían sepultado ese carbono en altos montículos de sedimentos finos. Según el escenario de Kennedy el enterramiento de carbono condujo al aumento del oxígeno, que aceleró aún más la producción química de minerales de la arcilla en la tierra, que a su vez condujo a una mayor tasa de enterramiento de carbono. De aquí se desprende que la «fábrica de minerales de la arcilla» puede haber contribuido en forma directa al aumento del oxígeno atmosférico y a la evolución del mundo vivo moderno.

La invención de los animales

Las proliferaciones de algas durante las épocas de invernadero, con ayuda del fósforo y otros nutrientes, contribuyeron a las acentuadas fluctuaciones en el oxígeno atmosférico. La fábrica de minerales de la arcilla puede haber amplificado el efecto. Y así, hace unos 650 millones de años el oxígeno atmosférico se habría elevado hasta casi los niveles modernos. La elevación del oxígeno, a su vez, se ha relacionado con la multiplicación de la vida multicelular compleja, pues organismos como las medusas y los gusanos sólo habrían podido

adoptar sus estilos de vida, muy activos y que exigen grandes cantidades de energía, con altos niveles de oxígeno. De hecho, el organismo multicelular más antiguo que se conoce aparece en el registro fósil hace unos 630 millones de años, precisamente después de la segunda glaciación global de bola de nieve.

Para entender el ascenso de la vida animal en la era Neoproterozoica primero debemos remontarnos mucho antes, hace más de mil millones de años, a la época previa a los mil millones de años «aburridos». La escasa evidencia fósil apunta a la aparición de una clase de vida unicelular completamente nueva hace unos dos mil millones de años. Hasta entonces todas las células parecen haber llevado vidas físicamente separadas, aunque codependientes. Pero hace unos dos mil millones de años, según una idea revolucionaria que Lynn Margulis expuso por primera vez en el campus Amherst de la Universidad de Massachusetts, una célula se tragó a otra completa. En vez de digerir la célula devorada, la mayor se apropió de la más pequeña en una relación simbiótica que transformó para siempre la vida en la Tierra.

Margulis es una fuerza creativa y una intelectual omnívora que ha consagrado su carrera científica a entender cómo interactúan y coevolucionan grupos de organismos; para ella mantener relaciones simbióticas y compartir los inventos biológicos es un tema que permea toda la historia de la vida. Sus ideas han alborotado algunos gallineros, en parte porque se desvían de la visión darwinista ortodoxa de la evolución como un proceso que ocurre fundamentalmente por mutación y selección. A pesar de las controversias la teoría de la endosimbiosis de Margulis es muy persuasiva y hoy en día se acepta en forma casi general. Las plantas, los animales y los hongos modernos están formados por células con muchas estructuras in-

ternas, como mitocondrias que funcionan como pequeñas plantas generadoras, cloroplastos que aprovechan la energía del Sol en el caso de los organismos fotosintéticos y el núcleo de la célula, que contiene la molécula genética ADN. Estos y otros «organelos» de las células complejas tienen sus propias membranas celulares y, en algunos casos, también su propio ADN. Margulis propuso que cada uno de estos organelos evolucionó a partir de células anteriores y más simples que fueron devoradas y finalmente cooptadas para hacer tareas bioquímicas específicas. Según nuestros cálculos, la transición comenzó hace unos dos mil millones de años y preparó el camino para una vida multicelular mucho más compleja.

Margulis sigue pensando que la evolución de la vida está impulsada por la simbiosis y por el intercambio de atributos entre organismos muy diferentes, y ha llevado esta idea más allá de la endosimbiosis (con frecuencia a lugares que la colocan fuera de los saberes establecidos). Una de sus batallas más recientes, muy bien resumida en la conferencia que dictó durante un encuentro de geólogos en Denver, Colorado, es su apoyo a una controvertida idea del biólogo británico Donald Williamson. En 2009 Williamson propuso que las mariposas representan la mezcla del material genético de dos animales muy diferentes, las orugas y las mariposas aladas. La controversia aumentó en intensidad cuando Margulis usó sus privilegios como miembro de la Academia Nacional de Ciencias para abreviar el proceso de revisión de sus pares y patrocinar la publicación de Williamson en *Proceedings*, la prestigiosa revista de la Academia. Algunos miembros se enfurecieron y dijeron que la hipótesis era «absurda», más adecuada para el *National Enquirer* que para una publicación científica. Margulis contestó que el artículo de Williamson merece un análisis y un debate serios. «No le estamos pidiendo a nadie que acepte las

ideas de Williamson», dijo, «sólo que las evalúen con base en la ciencia y el conocimiento y no en prejuicios viscerales».

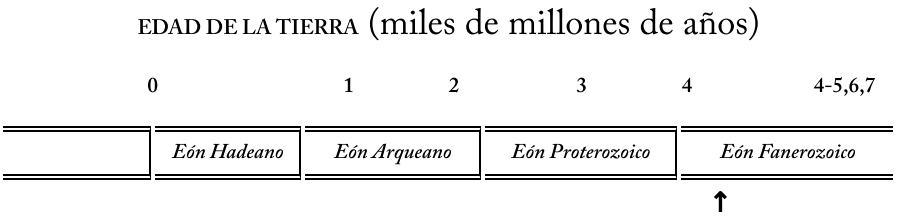
Quién sabe cuál sea el resultado de ese debate; lo cierto es que hoy la teoría de la endosimbiosis de Margulis es una idea bien establecida. Para la era Neoproterozoica las células complejas con núcleos y otras estructuras internas estaban bien establecidas y a punto de trasponer un nuevo umbral simbiótico. Hace más de seiscientos millones de años los organismos unicelulares aprendieron a cooperar, a congregarse, a especializarse, a crecer y a moverse como colectivo. Aprendieron a volverse animales.

Las evidencias fósiles más antiguas que existen de un ecosistema dominado por los animales proviene del llamado periodo Ediacárico, que comenzó hace 635 millones de años, poco después del segundo de los tres grandes eventos de bola de nieve de la Tierra. Los primeros fósiles con patrones claros se reconocieron en rocas de 580 millones de años de edad provenientes de Ediacara, en el sur de Australia (de ahí el nombre). Estos animales blandos, tal vez parientes de las medusas y los gusanos, dejaron marcas agradablemente simétricas, como si se tratara de hot cakes adornados con lindas líneas radiales o elegantes hojas estriadas de hasta 60 centímetros de ancho. En todo el mundo se han encontrado desde entonces fósiles parecidos en rocas de entre 610 y 545 millones de años de edad. Una de las más notables es la formación Doushantuo del sur de China, de 633 millones de años de edad y rica en fosfatos, que contiene montoncitos de células microscópicas que se han interpretado como óvulos y embriones animales. Estas estructuras, que crecieron en mares someros justo después de la glaciación Marinoana, se ven idénticos, hasta en el último detalle, a los embriones animales modernos.

Parece, pues, que el severo ciclo de bola de nieve-invernadero terminó desempeñando un papel central en la evolución del mundo moderno. Incluso es justo decir que nosotros, los organismos multicelulares, le debemos nuestra existencia a ese momento, hace 800 millones de años, cuando la Tierra alcanzó un momento climático crítico tras más de mil millones de años durante los que un suministro estable de luz solar, y de CO_2 que la absorbía, la mantuvo templada. Cuando la erosión de los nuevos continentes ecuatoriales consumió rápidamente el dióxido de carbono, y el hielo reflectivo de ambos polos se extendió hasta el Ecuador, las temperaturas de la Tierra se desplomaron durante millones de años, hasta que una acumulación constante de CO_2, tal vez amplificada por la rápida liberación de metano de los suelos oceánicos, desencadenó un efecto invernadero igualmente veloz.

Estos erráticos ciclos de bola de nieve-invernadero revelan, tal vez más que cualquier otro evento en la historia de la Tierra, un planeta fuera de equilibrio. El indeciso clima del Neoproterozoico condujo directamente a un aumento inédito en el oxígeno atmosférico, una transición que abrió brecha para los primeros animales y plantas y para su colonización de los continentes. Con estas innovaciones biológicas, la Tierra pronto se vio infestada de cosas nuevas: criaturas que nadaban, excavaban, reptaban, volaban y exhibían hábitats y comportamientos más extremos. Con la aparición de una atmósfera rica en oxígeno, hace 650 millones de años, tú, viajero en el tiempo, podrías haberte parado por primera vez en ese paisaje marciano y respirar su aire sin morir asfixiado. Por primera vez podrías haberte alimentado de cieno verde y te habrías salvado de una dosis fatal de radiación ultravioleta.

Hoy estamos entrando nuevamente en un periodo de dramáticos cambios climáticos, y parece que se están estableciendo procesos de retroalimentación positiva. El hielo glacial, y sus superficies reflectivas, se están derritiendo a un ritmo acelerado, y cada vez exponen más y más superficie oceánica y terrestre, que absorbe más y más energía del Sol. Estamos cortando y quemando árboles, con lo que inyectamos más dióxido de carbono a la atmósfera y reducimos el tamaño de los bosques que consumen CO_2. Y lo que es aún peor, la liberación acelerada de metano del permafrost y del hielo de las profundidades del océano puede elevar todavía más las temperaturas globales y desencadenar la liberación de aún más metano que termine inclinando la balanza. Si el pasado de la Tierra contiene alguna lección para nuestra época, la historia del repentino cambio climático durante el Neoproterozoico debería ser la primera en la lista, porque si bien ese ir y venir entre bolas de nieve e invernaderos abrió nuevas oportunidades para la vida en evolución, cada episodio de inversión climática barrió con casi todos los seres vivos que existían.



Capítulo 10

La Tierra verde

El surgimiento de la biosfera terrestre

Edad de la Tierra: de 4000 a 4500 millones de años (los últimos 542 millones de años)

La tectónica de placas salvó a la Tierra de sí misma. El interior de la Tierra en convección provocó, lentamente pero sin parar, que el extenso continente ecuatorial Rodinia se rompiera en fragmentos más manejables. Las masas continentales comenzaron a viajar hacia los polos y liberaron la región del Ecuador de tierras cubiertas de hielo, lo que contribuyó a moderar el extremoso ciclo de bola de nieve-invernadero. Las nuevas y abundantes algas fotosintéticas también ayudaron a atenuar las salvajes fluctuaciones de dióxido de carbono y a aumentar las concentraciones de oxígeno hasta niveles cercanos a los modernos. La Tierra no ha vuelto a soportar excesos de temperatura global como los que experimentó en la época anterior al eón Fanerozoico.

Durante estos últimos 542 millones de años se han operado al menos cinco tipos distintos de cambio en la Tierra. Los continentes siguieron moviéndose: primero cerraron un océano para formar otro gran supercontinente, y luego se

rompieron para formar el océano Atlántico, que sigue en crecimiento. El clima ha fluctuado de caliente a frío y de regreso muchas veces, aunque nunca ha alcanzado los extremos del Neoproterozoico. El oxígeno ha disfrutado un tercer evento de enriquecimiento, seguido por un descenso a la mitad de esos niveles y luego un nuevo rebote. Los niveles del mar también han cambiado repetidamente y han remodelado dramáticamente las costas de la Tierra. Los registros geológicos revelan incontables descensos y caídas, algunos de cientos de metros. Pero la transformación más espectacular de todas es la vida, que ha cambiado y evolucionado en forma radical e irreversible. Y a lo largo de todas estas alteraciones, la vida y las rocas han coevolucionado.

La Tierra siempre ha sido un planeta cambiante, pero la historia del eón Fanerozoico nos resulta más clara, y por lo tanto nos parece proporcionalmente más elaborada y sutil en sus variaciones, gracias a un registro geológico más extenso y menos alterado. La clave de esta fecunda historia es una abundancia de fósiles exquisitamente preservados, como consecuencia de la recién descubierta habilidad de la vida para fabricar partes duraderas: dientes, conchas, huesos y madera. Los animales y las plantas resultaron ser particularmente sensibles a los cambios en el entorno superficial de la Tierra, así que sus restos fosilizados dejan registro de los sucesivos episodios de adaptación. Los microbios son capaces de resistir casi cualquier tormenta; esa resiliencia, aunada a sus formas sencillas —no muy útiles para identificarlos— y su escasez en el registro fósil significan que no puede reconocerse ninguna extinción de masas en las rocas del Precámbrico, cuando los microbios eran reyes. Pero el eón Fanerozoico es una historia totalmente distinta.

Así, durante los últimos 542 millones de años vemos la Tierra bajo una luz nueva: no como un planeta que cambia parsimoniosamente a lo largo de decenas o cientos de millones de años, sino un mundo en rápida evolución y en el que cada lapso de cien mil años resulta visiblemente distinto de los anteriores. Esto es así en parte porque tenemos un registro más detallado, pero también porque es la naturaleza de la vida. Los animales y las plantas, en especial las criaturas que colonizan la tierra, responden rápidamente a sus ciclos: o evolucionan a toda velocidad o mueren. Y cuando las viejas especies desaparecen, aparecen nuevas para tomar su lugar.

Todo el mundo es un escenario

Durante los últimos 550 millones de años los continentes, en continuo movimiento, siguieron ofreciéndole a la evolución de la Tierra y a su cada vez más diversa biota un escenario cambiante. Entendemos bien los rasgos generales de la historia, una obra bastante simple en tres actos.

Primer acto: el inicio del periodo Cámbrico, hace 542 millones de años, se encontró con que Rodinia, el supercontinente del Proterozoico, estaba roto en varios grandes trozos dispersos. El fragmento más grande, que se extendía desde el polo sur hasta más allá del Ecuador, era el extenso continente Gondwana, bautizado así por una región de India que ha resultado muy reveladora en términos geológicos. Todos los continentes australes de la actualidad, así como un buen pedazo de Asia, estaban hechos un revoltijo en esta masa terrestre gigante que medía casi 13 mil kilómetros de norte a sur. Otros continentes pos-Rodinia, todos ubicados en el hemisferio sur, incluían el núcleo de Laurencia (lo que hoy es América del

Norte y Groenlandia) y otras grandes islas (incluyendo buena parte de Europa). El hemisferio norte estaba dominado por un océano global, prácticamente desprovisto de tierra. Durante los siguientes 250 millones de años las placas transportaron todos los continentes hacia el norte. Laurencia creció a más del doble de su tamaño cuando se fusionó primero con lo que se convertiría en Europa y luego con una buena parte de Siberia.

Segundo acto: hace unos trescientos millones de años Gondwana, que se dirigía al norte, chocó con Laurencia para formar el supercontinente más reciente, Pangea. Una de las consecuencias geológicas más espectaculares de esta fusión entre Gondwana y Laurencia fue que se cerró el antiguo mar que dividía América del Norte y África, una colisión que hizo nacer los montes Apalaches. Hoy los Apalaches, que se extienden desde Maine hasta Georgia, parecen una cadena montañosa más bien benigna y redondeada. Esta topografía suave y ondulada habla con elocuencia sobre el poder de la erosión, pues hace trescientos millones de años sus picos escarpados de 10 u 11 kilómetros de alto —y aún en ascenso— rivalizaban con los Himalayas actuales como las montañas más grandes en la historia de la Tierra. Pangea era un continente asimétrico, pues concentraba casi toda la tierra firme del planeta en un solo lado, tres cuartas partes de la cual se ubicaban en el hemisferio sur. Durante cien millones de años Pangea estuvo rodeada por el superocéano Pantalasa (un nombre muy apropiado, que en griego significa «todo mar»).

Tercer acto: hace 175 millones de años comenzó a abrirse el océano Atlántico, cuando la gran masa de tierra pangeana comenzó a fragmentarse en siete pedazos principales. Primero se separaron Laurencia y Gondwana y formaron el incipiente Atlántico norte, y la creciente división continental se prolongó

aún más hacia el norte y el sureste. La Antártida y Australia se separaron de Gondwana y se dirigieron hacia el sur, para formar sus propias islas continentes. Una enorme grieta entre América del Sur y la costa oeste de África dio origen al Atlántico sur, e India se separó de la costa este de África y comenzó su viaje de cincuenta millones de años hacia el norte, para eventualmente estrellarse contra el continente asiático y provocar una abolladura que llamamos los Himalayas.

A lo largo de su extensa historia cada uno de los jugadores continentales corrió de aquí para allá, formó sociedades y luego las rompió, como si se tratara de un drama humano. Resulta muy útil ver cómo se desarrolla esta danza global: sólo escribe «animaciones de Pangea» en Google, y recuerda, cuando las veas, que estos continentes en movimiento impusieron también otros cambios en la Tierra. El aumento en la extensión de las costas hizo que la vida proliferara en las aguas someras. Las masas polares ocasionaron el crecimiento de espesas placas de hielo, lo que a su vez disminuyó el nivel del mar. Sobre las grandes masas terrestres la vida evolucionó inmersa en una dura competencia, pero esta evolución continuó en forma independiente en los continentes aislados o en los mares separados por grandes extensiones. La ubicación de las cadenas montañosas y los océanos alteró el clima. A lo largo de la historia cada uno de los grandes ciclos de la Tierra ha afectado a todos los demás, y lo sigue haciendo.

¡La explosión animal!

Durante miles de millones de años la cantidad de vida microbiana en la Tierra ha fluctuado en respuesta al clima, los nutrientes, la luz solar y otros factores. Hay nuevas evidencias,

en forma de sedimentos depositados en mares someros, que sugieren que las grandes proliferaciones de algas de finales del Neoproterozoico fueron más que unos cuantos parpadeos pasajeros. Por primera vez las algas verdes fotosintéticas desarrollaron nuevas estrategias para hallar un lugar seguro en la tierra pantanosa, y los continentes finalmente comenzaron a tener un poco de verde en las orillas en vez de un naranja oxidado, estilo marciano, contra el océano azul. Cuando aumentó la concentración de oxígeno atmosférico también lo hizo la capa de ozono de la estratosfera, la barrera contra la radiación que protege la superficie sólida de la Tierra de los letales rayos ultravioleta del Sol. Esta burbuja protectora fue un preludio esencial para que surgiera una biosfera terrestre viable compuesta por plantas firmemente enraizadas y por animales que se movían libremente por la superficie.

Resulta extraño que a la vida animal le tomara otros cien millones de años conquistar la Tierra. Durante mucho tiempo la mayor parte de la innovación biológica ocurrió en los mares someros e iluminados por luz solar. Durante cuarenta millones de años las medusas y los gusanos pluricelulares parecen haber dominado los océanos posglaciales. Un sinnúmero de animales de cuerpos blandos, y por lo tanto rara vez conservados en el registro fósil, se alimentaban de los residuos que caían al fondo del mar y se escondían en los recovecos de los depósitos minerales construidos por sus ancestros microbianos. Durante decenas de millones de años parece haber prevalecido un *statu quo* ecológico.

Hace unos 530 millones de años un extraordinario truco evolutivo vino a romper para siempre ese *statu quo*: muchos tipos de animales aprendieron a construir sus propios caparazones a partir de minerales duros. Nadie está seguro de qué produjo este acontecimiento evolutivo, aunque la vida ya llevaba

unos cuantos miles de millones de años depositando estratos minerales en los estromatolitos, esas estructuras similares a arrecifes. De algún modo, en algún lugar, tras la glaciación Gaskiers hace 580 millones de años un animal desconocido desarrolló el exquisito truco de fabricar sus propias partes duras protectoras a partir de minerales comunes, en general carbonato de calcio o sílice. Este invento significó mucho en la lucha por la supervivencia, pues los depredadores preferían devorar un bocado de cuerpo blando que gastar energía rompiendo un duro exoesqueleto mineralizado. Pronto el nombre del juego era hacer tu propio esqueleto o morir. El registro fósil que resultó es de una riqueza sorprendente, y marca un momento en el que los estratos sedimentarios se llenaron de restos de seres vivos, una época que ha sido bautizada la «explosión» del Cámbrico.

Explosión es un nombre engañoso. No se trató de una transformación repentina; tuvieron que pasar millones de años para que la «biomineralización» se generalizara. Unas cuantas esponjas con espinas endurecidas preservadas en la formación rica en fósiles de Doushantuo en la provincia de Gizhou, en el sur de China, pueden haber aprendido el truco hace 580 millones de años. Hace unos 550 millones de años, a finales del periodo Ediacárico, varias criaturas parecidas a gusanos habían aprendido a construir en el fondo del mar, a partir de minerales de carbonatos, refugios protectores con forma de tubo.

La primera fauna con caparazón que es posible reconocer —pequeña y frágil— aparece por todo el mundo en rocas de unos 535 millones de años. (Recuerdo que cuando era estudiante hice un viaje de campo muy especial a Nahant, en la costa de Massachusetts, al norte de Boston, para recolectar estos fósiles inusuales. El fresco aire del mar, las olas que rompían en la pintoresca costa rocosa, las magníficas nubecitas

blancas y el océano azul, todo era memorable… los trozos de fósiles erosionados, apenas visibles a simple vista, no lo eran tanto).

La verdadera «explosión» ocurrió unos cuantos millones de años después, hace aproximadamente 530 millones de años, cuando aparecieron en escena toda clase de animales con caparazón. Y a esto le siguió una carrera armamentista evolutiva. Los depredadores acorazados y las presas acorazadas alcanzaron tamaños cada vez mayores. Aparecieron dientes y garras, así como placas óseas protectoras y afiladas espinas defensivas. Los ojos se volvieron obligatorios en el despiadado mundo de los océanos paleozoicos, rebosantes de vida. Vivieron y murieron incontables generaciones de criaturas con caparazón, y sus bioesqueletos de carbonatos contribuyeron a formar inmensas capas de caliza resistente que han decorado la Tierra durante los últimos quinientos millones de años: el mundo está salpicado por formidables crestas y acantilados de carbonatos repletos de fósiles que dominan el paisaje en docenas de países, forman los picos más altos de las Montañas Rocosas canadienses y los blancos acantilados de Dover, e incluso rematan la cima del monte Everest.

De todas las innovaciones evolutivas del Cámbrico las más apreciadas y las más fotogénicas son unas criaturas de grandes ojos llamadas trilobites. Aquí tengo que dar una advertencia: adoro a los trilobites. Desenterré mi primer espécimen casi completo no muy lejos de la casa donde crecí, en Cleveland, Ohio, cuando tenía seis o siete años, y desde entonces los colecciono. Hoy mi tesoro consta de más de dos mil piezas, que doné al museo Smithsonian. (Puedes ver algunos de los mejores especímenes en la sala Sant Ocean del National Museum of Natural History). De modo que me confieso parcial.

Aunque el surgimiento de la biomineralización fue gradual, hace 530 millones de años los seres vivos con partes duras ya parecen estar por todos lados. En estrato tras estrato de roca sedimentaria, en cualquier región del mundo se conservan toda clase de trilobites con muchas patas y almejas estriadas, conchas de braquiópodos con aspecto de nueces y delicados briozoos con forma de abanico, esponjas porosas y corales parecidos a cuernos. En secuencias de roca desde Montana hasta Marruecos puedes tocar con la mano la capa exacta —la tajada precisa de historia— en la que realmente despegó el deslumbrante invento de la bioarmadura.

Uno de los lugares más impresionantes para estudiar la súbita transición de animales de cuerpos blandos a animales con caparazón se encuentra cerca del histórico pueblo oasis de Tiout, anidado en las faldas de las espectaculares montañas Anti-Atlas en el occidente de Marruecos. Allí, miles de metros de sedimentos de carbonatos expuestos, que se elevan casi verticales para formar las escarpadas paredes del valle del río Souss, proveen un registro continuo desde el fin del Ediacárico hasta comienzos del Cámbrico. Capa tras capa, la delgada caliza café-rojiza está completamente desprovista de fósiles conocidos. Puedes caminar un kilómetro por el lecho de grava del río, que está seco la mayor parte del año, y no ver más que alguna señal ocasional de una madriguera de gusano.

Y de pronto, en una capa de caliza que se encuentra en una colina sobre el pueblo —un horizonte que, visto a la distancia, no parece diferente a los que hay antes o después— aparecen los fósiles. El antiguo *Eofallotaspis*, tal vez el más antiguo de los trilobites, marca el comienzo de la explosión cámbrica. En capas que están a poca distancia sobre este estrato histórico (es decir, más jóvenes), se encuentran nuevas especies: las características formas elípticas, de cinco centímetros de largo, de

Choubertella y *Daguinaspis*. Esta última especie es, por mucho, la más común, pero uno de los afloramientos más productivos y accesibles se encuentra justo a la mitad de la tumba de un santo, un sitio musulmán sagrado. La pequeña estructura blanca, rematada por un domo, está rodeada por una pared de piedra baja repleta de trilobites. No se ve muy bien que los geólogos visitantes saquen su martillo y su cincel para desacrar ese tranquilo lugar. Los niños del lugar, sin embargo, parecen estar exentos, y golpean las ventanillas de los autos para que los turistas les compren sus «bichos de Tiout».

«¡Oiga, señor, cien dirhams!». Unos doce dólares.

No regateo. Los compro todos.

Cambio de facies

Durante muchos años mis afanes como coleccionista de fósiles se limitaron a los bichos. Es muy difícil exagerar la emoción que se siente al partir en dos una piedra y encontrarse con un trilobite completo en su interior. Los pescadores deben sentir una excitación parecida cuando pica un gran pez, y los jugadores de póker cuando reciben un *full house*; a mí me llega cuando encuentro un animal exquisito que lleva quinientos millones de años oculto dentro de una piedra.

Durante años esta cacería fue suficiente. Luego, ya avanzados mis estudios de posgrado, en la primavera de 1970, tomé mi primer curso de paleontología de verdad con el venerable Robert Shrock. Durante casi cuatro décadas Bob Shrock dio clases en el MIT, y durante casi veinte años, tras la segunda guerra mundial, dirigió allí el departamento de geología y geofísica. Era un gigante en el campo, con muchas publicacio-

nes clásicas, tal vez la más notable de las cuales era el *Index Fossils of North America*, un monumental compendio fotográfico de las especies características de cada intervalo geológico desde la explosión del Cámbrico.

Robert Shrock tenía un talento natural como profesor y una sonrisa amable. Sus clases estaban llenas de humor y de una pasión descarada por su profesión. Enseñaba en un estilo avuncular, narrando alegres historias de épocas pasadas. Nos contó sobre el descubrimiento casual (a lomos de caballo) de Burgess Shale, en la Columbia Británica, un sitio de 505 millones de años cuyos incomparables fósiles de animales de cuerpos blandos se hicieron famosos gracias al libro de Stephen Jay Gould *Wonderful Life* (*La vida maravillosa*). Gould describió los encantadores fósiles de rana que se encontraron preservados en el fino cieno depositado dentro de un tocón de trescientos millones de años en Joggin, en la costa occidental de Nueva Escocia (las ranitas saltaban dentro de los tocones huecos, pero no podían volver a salir). Dibujó vívidas imágenes de la vida hace noventa millones de años, cuando un enorme mar interior cubría las que hoy son las grandes planicies del medio oeste de Estados Unidos, un mar en el que los reptiles monstruosos y los amonites parecidos a calamares competían por la supremacía.

Por una extraña casualidad, mi esposa, Margee (entonces una estudiante avanzada en el Wellesley College), y yo terminamos siendo los últimos dos alumnos de Bob Shrock. En la primavera de 1970 las protestas estudiantiles contra la guerra de Vietnam se tornaron violentas; las clases se interrumpieron y algunas propiedades fueron destruidas. Como había muchas distracciones los administradores del MIT le dieron a los estudiantes la opción de tomar cursos de «aprobar o reprobar» para saltarse los exámenes finales. Margee y yo éramos los únicos

dos alumnos que buscábamos un título en paleontología. Nuestro agotador examen final, que Shrock nos aplicó poco a poco a lo largo de una semana, consistió en identificar todos los especímenes desconocidos que había en una bandeja con cien fósiles y luego *dibujar los especímenes a mano*. Admito que dibujar del natural es una excelente forma de pulir tus capacidades de observación, pero yo no era para nada un artista. Cada boceto a lápiz era una minipesadilla; el examen duró una eternidad y utilicé más gomas de las que puedo recordar.

Ésa fue la última clase de paleontología de Bob Shrock. El nombramiento del famoso sismólogo Frank Press como director del departamento, en 1965, produjo un cambio de guardia y un rápido viraje hacia una aproximación a las ciencias de la Tierra más cuantitativa y basada en la física. Dibujar fósiles a mano estaba fuera de lugar en ese mundo moderno en el que la tectónica de placas transformaba los currículos igual que transformaba los continentes.

Inspirados por esa última clase, Margee y yo pasamos muchos fines de semana acampando en sitios cercanos ricos en fósiles. Durante los siguientes años recolectamos helechos fósiles en el sur de Massachusetts, corales en el noreste de Pensilvania, braquiópodos en el este de Nueva York y trilobites en el noroeste de Vermont. El curso de Shrock nos había enseñado a ver los fósiles en un contexto nuevo. Cada tipo de roca y cada conjunto de fósiles nos narraba historias de ecosistemas antiguos y diversos.

Aprendimos que siempre se están formando diferentes tipos de rocas —diferentes facies—, cada una en un lugar diferente y a diferente profundidad bajo el agua. Las areniscas son las que se forman más cerca de las playas, en zonas de marea irregulares y someras. Estas rocas contienen poblaciones de almejas resistentes y de caracoles fósiles armados de gruesos ca-

parazones, capaces de soportar el golpeteo del oleaje. La caliza, en contraste, representa antiguos arrecifes coralinos, así que contiene una rica variedad de animales: crinoideos al acecho, estrellas de mar, caracoles, braquiópodos y otros grupos que prosperan en las lagunas protegidas e iluminadas por la luz solar. Los muchos trilobites elegantes que vivieron en los ecosistemas de arrecifes tienden a tener grandes ojos que podían abarcar los 360 grados de su entorno. Más lejos de la costa los esquistos negros se acumulan lentamente en las profundas aguas oscuras; su fauna suele incluir organismos filtradores y trilobites ciegos, animales muy diferentes de los que vivieron en las zonas fóticas someras.

Si cada afloramiento dibuja la imagen de un tiempo y un lugar, una secuencia de rocas apiladas una sobre otra nos cuenta una historia de cambio. Algunas secuencias particularmente dramáticas de tipos de rocas estratificadas suelen encontrarse asociadas con depósitos de carbón muy valiosos (y por lo tanto, muy bien estudiados). El carbón, que se formó en grandes cantidades en las zonas costeras pantanosas hace trescientos millones de años, suele encontrarse entre capas de arenisca, que a su vez yace entre capas de esquistos. Esta secuencia —esquisto, arenisca, carbón, esquisto, repetida una y otra vez— revela cambios importantes en el nivel de los océanos, que descendían y se elevaban y volvían a descender, tal vez en respuesta a la retirada y el avance de los casquetes polares y los glaciares. Una conclusión inevitable es que durante cientos de millones de años los niveles de los océanos fluctuaron continuamente cientos de metros.

Para los humanos modernos, con nuestras inmensas ciudades costeras y nuestra enorme infraestructura playera, la altura de los océanos (que sólo cambia con los ciclos de las mareas) parece ser un aspecto inalterable del planeta. Es difícil imagi-

narse un cambio de tres metros, mucho menos uno de cientos de metros. Pero el registro sedimentario reciente es muy claro a este respecto. A lo largo de las últimas decenas de miles de años los océanos han estado a niveles cincuenta metros por arriba y cien por debajo de los niveles actuales. No existe ninguna duda de que estos cambios van a volver a ocurrir y alterarán radicalmente las formas de las costas continentales. Ésta es la historia que cuentan las rocas y sus ecosistemas fósiles.

La vida en la Tierra

La transformación terrestre más dramática en la historia de la Tierra sólo pudo ocurrir tras el surgimiento de las plantas terrestres, una innovación de la que se tiene noticia gracias a resistentes esporas microscópicas fósiles muy características que se encuentran en rocas de hasta 475 millones de años de edad. Aunque no se han encontrado fósiles de la vegetación de esa época, que era delicada y se descomponía fácilmente, es probable que esas primeras plantas verdaderas se parecieran a las hepáticas modernas, descendientes rastreras y sin raíces de las algas verdes que sólo podían sobrevivir en lugares bajos y húmedos. Por un lapso de más de cuarenta millones de años las esporas resistentes a la descomposición, que se encuentran en formaciones de rocas alrededor del mundo, constituyen la única evidencia física de las plantas terrestres. La evolución de estos aguerridos pioneros verdes parece haber sido continua pero lenta.

Hace unos 430 millones de años un cambio importante en la distribución global de esporas fósiles indica una marcada transformación en la distribución de las plantas terrestres. Durante los siguientes treinta millones de años las esporas de

hepáticas se volvieron menos abundantes, y aquellas similares a los musgos modernos y a las plantas vasculares simples se volvieron dominantes. Las rocas de este intervalo en Escocia, Bolivia, China y Australia también contienen los fósiles más antiguos de plantas propiamente dichas que resultan incontrovertibles, restos fragmentarios de licopodios y otras plantas que se sospecha que son parientes de las plantas vasculares modernas (aquellas que poseen un sistema interno de tuberías lleno de agua). A falta de largos sistemas de raíces, estas plantitas regordetas se habrían resignado a crecer en áreas bajas y húmedas.

El registro fósil mejora con el tiempo, conforme las primeras plantas se extendieron y se volvieron más fuertes. Hace cuatrocientos millones de años las plantas vasculares primitivas habían comenzado a colonizar regiones antes desiertas a lo largo y ancho del planeta. Se veían como arbustos en miniatura, alargados y sin hojas, con tallos y ramas verdosas, fotosintéticas y hambrientas de sol que apenas se elevaban unos centímetros del suelo. Sus raíces podían penetrar con eficiencia el suelo rocoso, donde servían como fuertes anclas, y la acción capilar distribuía el agua a las partes altas de la planta.

A pesar de su evidente importancia para la colonización de la tierra, durante mucho tiempo las plantas fosilizadas han ocupado un segundo lugar, detrás de los trilobites y los dinosaurios. Los animales tienen estilos de vida más dinámicos como depredadores y presas, y parecen ser más variados en formas y en comportamiento. Más parecidos a nosotros. Además, las plantas fósiles tienden a ser fragmentarias; en general se encuentra una hoja o un tallo aislado, un trozo de corteza o un poco de madera con un patrón característico. Las plantas carecen de lo que el paleobotánico Kevin Boyce, de la Univer-

sidad de Chicago, llama «la agradable materialidad de las almejas», y sin embargo tienen maravillosas historias que contar.

Conocí a Kevin en el año 2000, cuando era un entusiasta y creativo estudiante de posgrado en Harvard y colaboraba con Andy Knoll en la búsqueda de nuevos métodos para desentrañar las historias que cuentan algunos de los fósiles de plantas más antiguos de la Tierra. Kevin, lector voraz y escritor talentoso, tiene una gran habilidad para contar historias; es esa clase de científico que puede hacer que la historia de las plantas resulte cautivadora. Pero para poder contar nuevas historias sobre las plantas más antiguas de la Tierra, Kevin necesitaba obtener nuevos tipos de datos sobre las plantas fósiles. Andy mandó a Kevin al Laboratorio de Geofísica para que aprendiera técnicas microanalíticas para encontrar elementos, isótopos y moléculas, que nunca antes se habían aplicado en forma sistemática a las plantas fosilizadas.

Nuestro primer proyecto conjunto de investigación se concentró en los fósiles de plantas, extremadamente bien conservados, del sílex de Rhynie, en Aberdeenshire, Escocia, de cuatrocientos millones de años de edad. La vegetación de Rhynie se salvó de descomponerse cuando manantiales termales cercanos cubrieron sus tejidos con aguas ricas en minerales, lo que selló herméticamente y en parte remplazó la materia vegetal con sílice fino. Hace un siglo los geólogos descubrieron cantos de este sílex en una pared de piedra del pueblito de Rhynie. Hubo que excavar mucho para poder encontrar y extraer un tramo de roca firme. Los especímenes de sílex de Rhynie siguen siendo muy valiosos y muy difíciles de obtener, pero Kevin Boyce tuvo acceso, en Harvard, a viejas colecciones formadas por especímenes tan grandes como un puño y a secciones de roca pulida de unos cinco por diez centímetros, cortadas en lajas muy delgadas y montadas en vidrio, en las

que la anatomía de la planta —incluso los detalles celulares— puede estudiarse con ayuda de un microscopio. Estos fósiles revelan fragmentos de un paisaje extraño, al mismo tiempo familiar y profundamente desconocido, cubierto de plantas con troncos y ramas, cada una con tallos verdes fotosintéticos pero sin hojas.

Hace algunas décadas los esfuerzos por extraer información de los fósiles de plantas de Rhynie resultaban absolutamente heroicos. Había que preparar cientos de secciones delgadas, cada una de las cuales ofrecía una vista bidimensional de un complejo objeto tridimensional. Imagínate que tomas tu flor favorita, la sumerges en resina opaca y luego tratas de reproducir la forma de la flor cortando la resina en tiras delgadas y procurando reensamblar el conjunto. Esto es lo que los pioneros paleobotánicos tenían que hacer con los fósiles de Rhynie, y lo que encontraron fue un conjunto diminuto de plantas alargadas, extrañas y sin hojas, los ancestros de nuestro mundo verde.

Kevin Boyce tomó la decisión de revisitar el sílex de Rhynie para obtener nueva información sobre la antigua flora de la Tierra. Su estrategia era analizar nuevas secciones pulidas de los fósiles de Rhynie, más o menos del tamaño de una moneda de 25 centavos. Usamos una microsonda electrónica, una máquina que dibuja la distribución de los elementos químicos que se encuentran sobre una superficie de roca pulida, tal como nuestras secciones de sílex montadas en vidrio, que le resulta muy conocida a los mineralogistas pero que casi nunca usan los paleontólogos. Esperábamos descubrir si se había preservado algo del material vegetal original. El truco era calibrar la microsonda para encontrar carbono, un elemento más común en los seres vivos que en las rocas duras. Y estuvimos encantados de encontrar que los fósiles del sílex de Rhynie es-

tán repletos de carbono, y un carbono isotópicamente ligero, que es una señal convincente de su origen biológico. La distribución de carbono destacó las características estructuras tubulares de estas plantas vasculares primordiales. Nuestro primer artículo sobre el mapeo a nivel celular de una variedad de antiguas plantas fósiles, entre ellas los extraños tallos y las esporas vegetales de Rhynie, apareció en *Proceedings*, de la Academia Nacional de Ciencias, en 2001.

El siguiente paso de Kevin fue comprobar si podía obtener alguna información biomolecular de los fósiles. ¿Seríamos capaces de encontrar algún fragmento molecular que hubiera pertenecido a los tejidos vegetales originales? Kevin Boyce se concentró en un misterioso organismo parecido a un árbol, de ocho metros de alto, llamado *Prototaxites*, que hace cuatrocientos millones de años era el habitante más grande de tierra firme que conocemos. Los fósiles de este organismo resultan enigmáticos porque parecen carecer de las mismas estructuras celulares de otras plantas, mucho más pequeñas, con las que coexistieron. Sus «troncos», por el contrario, parecen haber estado compuestos por estructuras tubulares densamente entretejidas. Con ayuda de mis colegas del Laboratorio de Geofísica Marilyn Fogel y George Cody, Boyce pudo extraer y analizar lo que claramente eran fragmentos moleculares de varios especímenes de *Prototaxites*, que resultaron ser muy diferentes de los de otras plantas fósiles de la época. Su conclusión fue extraordinaria: *Prototaxites* fue un hongo gigante, tal vez la seta más grande en la historia de la Tierra.

La investigación de Kevin Boyce refuerza las conclusiones de la comunidad paleobotánica: hace cuatrocientos millones de años el paisaje de la Tierra finalmente se había vuelto verde, pero en una forma totalmente extraña. Algunas plantas ramudas y parecidas a arbustos compartieron el planeta con

enormes hongos semejantes a árboles y algunos pequeños insectos y animales similares a las arañas.

Se inventan las hojas

Hace cuatrocientos millones de años podrías haber sobrevivido bastante cómodamente sobre la Tierra. Había mucho oxígeno y agua. Existía alimento en forma de plantas y bichos. Se podía conseguir refugio bajo los paraguas de los *Prototaxites*. Pero el paisaje te habría parecido de lo más extraño. Había tallos verdes y ramas verdes por todos lados, pero ni una sola hoja.

De hecho, la invención de las primeras hojitas capaces de atrapar energía tomó decenas de millones de años más; resultó ser una transformación que elevó las apuestas en la lucha evolutiva del reino animal por conseguir luz solar. La planta más alta con las hojas más grandes tenía una ventaja, y de ahí proviene la evolución de los helechos, con su aspecto de abanico, de las estructuras ramificadas y de los sólidos troncos de madera. Hace 360 millones de años ya habían aparecido los bosques, un nuevo ecosistema totalmente terrestre. Por primera vez en la historia del planeta el suelo era de color verde esmeralda.

En un tema que se ha repetido una y otra vez, las rocas coevolucionaron con esta nueva vida verde. El surgimiento de plantas terrestres de rápido crecimiento, algunas de las cuales alcanzaron enormes alturas, tuvo profundas consecuencias mineralógicas. Las tasas de erosión de muchas rocas superficiales, entre ellas el basalto, el granito y la caliza, se acrecentaron en un orden de magnitud como consecuencia de la acción de las raíces y de sus rápidas estrategias de degradación bioquí-

mica. Los suelos resultantes, ricos en minerales de arcillas, materia orgánica y una multitud de microorganismos, se hicieron más profundos y más extensos, y le ofrecieron a las plantas más grandes y a los hongos un hábitat en continua expansión.

Los sistemas de raíces, aunque ocultos a la vista, evolucionaron también en formas extraordinarias: entre sus innovaciones más importantes estuvo el nuevo conjunto de relaciones simbióticas que se estableció entre las raíces de las plantas y enormes redes de filamentos fungales llamados micorrizas. Esta sorprendente estrategia evolutiva afecta a la gran mayoría de las plantas que ves hoy en día; de hecho, muchas tienden a crecer mal en suelos que carecen de esporas de hongos. Los hongos micorrizales extraen con gran eficiencia los fosfatos y otros nutrientes del suelo y se los entregan a la planta, que a su vez le proporciona a los hongos una dieta estable de glucosa, rica en energía y otros carbohidratos. Es difícil imaginarse esta geometría subterránea, pero la enorme red que forman las raíces de los árboles y los filamentos fungales bajo tierra con frecuencia es mucho más grande que el árbol que vemos sobre ella.

Conforme las plantas comestibles se dispersaron por el paisaje, también los animales experimentaron algunos profundos avances evolutivos. Los invertebrados —los insectos, las arañas, los gusanos y otras criaturas pequeñas— fueron los primeros exploradores de la Tierra. Los vertebrados, que aparecieron en forma de peces primitivos sin mandíbula hace unos quinientos millones de años, experimentaron más de cien millones de años de evolución en los océanos antes de emprender sus primeros intentos titubeantes de colonizar tierra firme. Hace unos 420 millones de años aparecieron feroces peces acorazados con mandíbulas hechas de placas de hueso; los ti-

burones cartilaginosos y los peces óseos, que nos resultan mucho más familiares, aparecieron y se diversificaron a lo largo de los veinte millones de años siguientes. Pero la tierra firme seguía estando totalmente desprovista de vertebrados.

Hace poco se descubrieron en China huesos fósiles de peces que vivieron hace 395 millones de años y que nos ofrecieron pistas sobre la primera transición evolutiva, de los peces con aletas a los animales terrestres de cuatro patas. Durante al menos veinte millones de años los peces coquetearon con los ambientes costeros, a veces someros y a veces secos. Unos cuantos peces desarrollaron pulmones primitivos y se aventuraron a pasar más y más tiempo en tierra firme, pero tuvieron que pasar muchos millones de años antes de que los primeros animales óseos se sintieran totalmente como en casa respirando oxígeno. Los huesos fósiles más antiguos que se conocen de un animal terrestre de cuatro patas, un pez que caminaba con unos pies semejantes a aletas, provienen de rocas que tienen unos 375 millones de años de edad.

Durante las últimas dos décadas —un periodo fructífero que ha visto espectaculares descubrimientos paleontológicos desde China hasta Pensilvania— se ha comenzado a entender la transición gradual de peces a anfibios. Algunos nuevos hallazgos de fósiles apuntan a un intervalo de treinta millones de años en los que aparecieron formas intermedias, cada vez más adaptadas a la tierra, pero que aún conservaban rasgos anatómicos claramente parecidos a los de los peces. Los primeros anfibios verdaderos aparecieron hace unos 340 millones de años, a la mitad del periodo Carbonífero, una época en la que en las zonas bajas de todo el mundo prosperaban los bosques pantanosos. Estos animales terrestres primitivos, que se caracterizaban por tener cráneos anchos y aplanados y estar equipados con patas muy separadas, pies con cinco dedos, oídos ade-

cuados para escuchar en el aire y otras adaptaciones terrestres, eran claramente diferentes de sus ancestros peces. Para el periodo Carbonífero la superficie sólida de la Tierra había alcanzado, por primera vez, una apariencia sorprendentemente moderna, con densos bosques verdes poblados de altos helechos parecidos a árboles, pantanos fríos y húmedos y prados exuberantes donde habitaba un creciente elenco de insectos, anfibios y otras criaturas. Y gracias a la profunda influencia de la vida, las rocas y los minerales superficiales de la Tierra también desarrollaron una diversidad y una distribución parecidas a las modernas.

Esto no quiere decir que el planeta haya alcanzado un estado de estasis. Los climas fluctuaron, las sequías y las inundaciones abrumaron la tierra y los ocasionales impactos de asteroides y las erupciones de supervolcanes le provocaron a la vida algunos traumas de los que esperamos jamás ser testigos. Pero la Tierra y su biota han probado una y otra vez que son resistentes a estas afrentas. La vida siempre encuentra una forma de adaptarse a las circunstancias, cualesquiera que sean.

La tercera Gran Oxidación

Hace unos trescientos millones de años los bosques de la Tierra prosperaban. Y de hecho se producía y quedaba sepultada tanta biomasa en forma de hojas que comenzó a formarse un nuevo tipo de roca, el carbón negro, rico en carbono, que surgía como resultado de la compactación de las gruesas masas de plantas muertas. Una consecuencia de este secuestro de carbono orgánico fue una nueva elevación de oxígeno atmosférico, igual que ocurrió antes, durante el evento de oxidación del Neoproterozoico. Este aumento en el oxígeno fue gradual;

pasó de 18 por ciento de la atmósfera hace 380 millones de años a 25 por ciento hace unos 350 millones de años, y hasta un extraordinario 30 por ciento o más hace 300 millones de años. De hecho, según algunos cálculos el contenido de oxígeno de la atmósfera se disparó hasta más de 35 por ciento, bien por arriba de los niveles modernos. Y estas cifras extremas no son meras suposiciones: existen hermosos especímenes de ámbar (resina de árbol fosilizada) del Carbonífero que preservan antiguas burbujas de atmósfera que aún contienen treinta por ciento de oxígeno o más.

El aumento en el oxígeno tuvo consecuencias benéficas para la vida animal. Que hubiera más oxígeno quería decir que había más energía y que los animales podían mantener índices metabólicos mayores. Algunas criaturas aprovecharon el empujoncito y crecieron… mucho. El ejemplo más dramático son los insectos gigantes, entre ellos las libélulas monstruosas, con alas de 60 centímetros de envergadura. El aumento en el oxígeno también mejoró la densidad de la atmósfera e hizo que volar y planear resultara mucho más fácil. Sin duda, otros animales migraron a zonas altas previamente inhabitables cuyo aire, ahora más denso, era posible respirar.

Durante un lapso de decenas de millones de años la vida floreció en el supercontinente Pangea. El clima era benévolo y los recursos abundantes, y la vida evolucionó sin preocupaciones. Pero hace 251 millones de años la vida colapsó en forma bastante repentina y misteriosa, en la que ha sido la extinción más catastrófica en la historia de la Tierra.

La Gran Mortandad y otras extinciones masivas

Durante los últimos 540 millones de años el registro fósil ha venido aumentando. Esto nos habla de un derroche de inventos biológicos: aparecieron cientos de miles de especies conocidas de corales y crinoideos, braquiópodos y briozoos, almejas y caracoles, por no mencionar el inmenso número de animales microscópicos. Los especialistas calculan que se conocen 20 mil especies distintas de trilobites, y cada año se describen docenas más. Dado que los trilobites sólo habitaron la Tierra durante unos 180 millones de años (entre 430 y 250 millones de años antes de nuestra era), el promedio es de una nueva especie de trilobite cada pocos miles de años. Si tomamos en cuenta toda la rica diversidad de vida fósil, durante quinientos millones de años deben haber aparecido nuevas especies, en promedio, cada siglo.

Lo que no resulta tan inmediatamente obvio a partir del registro fósil son algunos terribles episodios de muerte masiva, la extinción súbita de millones de especies. Las cosas nuevas son relativamente llamativas, y los paleontólogos no son inmunes a la tentación de describir «la primera» o la «más antigua» aparición de un taxón importante o de un rasgo particular. La primera planta, el primer anfibio, la primera cucaracha y la primera serpiente (aunque con patitas traseras vestigiales), todos estos hallazgos fósiles han sido noticia. Un artículo reciente incluso proclamó el descubrimiento del pene más antiguo que se conoce en la Tierra (y que le perteneció a una araña de 400 millones de años de antigüedad), otro hallazgo extraordinario del sílex de Rhynie.

Pero en el registro fósil es más difícil reconocer aquello que se pierde. Entender las extinciones requiere catalogar la diversidad fósil capa por capa, intervalo de tiempo por intervalo de tiempo, a todo lo largo del planeta. Varias décadas de esfuerzo han sido recompensadas con la documentación de cinco gran-

des extinciones masivas, cinco épocas infernales durante los últimos 540 millones de años en las que la Tierra ha sufrido la pérdida de más de la mitad de sus especies. Conforme se acumulan los datos empieza a parecer que pueden haber sucedido hasta otros quince episodios de extinción masiva, si bien menos severos.

No resulta fácil documentar la pérdida repentina de especies a partir del registro fósil. A causa de los muchos avances y retiradas de los océanos, la apertura y el cierre de mares someros, la reducción en la velocidad de la sedimentación durante los periodos de frío y las pérdidas irreversibles debidas a la erosión, el registro geológico está parchado e incompleto, como una enciclopedia a la que le hubieran arrancado muchas páginas al azar y a la que le faltaran volúmenes completos. También es difícil obtener las edades exactas de los estratos y hacerlas concordar con las de las formaciones en lugares opuestos del planeta. Así que la desaparición de cualquier grupo de animales podría reflejar, simplemente, una omisión un poco más larga en el registro geológico. Sin embargo, conforme crecen las bases de datos de fósiles y los paleontólogos de todo el mundo comparan notas, las mayores extinciones tienden a destacar sobre el telón de fondo de la vida y la muerte comunes y corrientes.

El fin de la era Paleozoica, hace 251 millones de años, fue testigo de la extinción más grande de todas. Se calcula que el 70 por ciento de las especies terrestres y un colosal 96 por ciento de las especies marinas desaparecieron; este catastrófico acontecimiento global se llama la Gran Mortandad. La Tierra no vio, ni antes ni después, la desaparición de tantas criaturas (incluidos los trilobites).

Los científicos no se han puesto de acuerdo sobre las causas de la Gran Mortandad. Sin duda no tuvo una sola causa sen-

cilla, como el impacto de un asteroide gigante, ni ocurrió toda al mismo tiempo, sino que pueden haber convergido muchos acontecimientos que se retroalimentaron entre sí. Para empezar, los niveles de oxígeno habían comenzado a descender rápidamente de su máximo de 35 por ciento durante el Carbonífero; hace 251 millones de años apenas se alcanzaba 20 por ciento, que es suficiente oxígeno para que sobreviva la vida animal compleja, pero el descenso puede haber añadido una causa de estrés para los animales que habían desarrollado metabolismos más exigentes. El fin del Paleozoico también vio un episodio de enfriamiento global y una pequeña glaciación durante la cual una gruesa capa de hielo cubrió el polo sur de Pangea. Un gran descenso en los niveles del mar, por lo tanto, habría provocado un estrés adicional al exponer la mayor parte de las plataformas continentales del mundo. Las plataformas continentales son la biosfera más productiva de los océanos, así que la pérdida de una gran parte de estas zonas costeras someras habría limitado el crecimiento de los arrecifes de coral y de otros ecosistemas acuáticos de aguas poco profundas muy diversos, lo que a su vez habría estrechado todas las redes alimenticias del océano.

El vulcanismo a gran escala que ocurrió a finales de la era Paleozoica y que casi coincidió exactamente con la extinción masiva hace 251 millones de años representa una perturbación más de la biosfera de la Tierra, otro ejemplo de influencia de la geosfera sobre la biosfera. En Siberia, una prolongada megaerupción que arrojó casi dos millones de kilómetros cúbicos de basalto, uno de los eventos volcánicos más grandes de la Tierra, debe haber puesto en gran peligro el medio ambiente del planeta. Durante cientos de miles de años las oleadas de cenizas y polvo volcánicos deben haber reducido la cantidad de energía del Sol que alcanzaba la superficie y sin duda exa-

cerbaron cualquier glaciación. La exhalación de enormes cantidades de compuestos tóxicos de azufre debe haber provocado la caída de lluvia ácida y un mayor deterioro ambiental.

Por si todas estas agresiones ambientales no hubieran sido suficientes, algunos científicos apuntan al colapso de la capa de ozono como otro posible factor de estrés en la mayor extinción masiva de la Tierra. Algunas esporas fósiles mutantes que se encuentran en rocas del final del Paleozoico en todo el mundo, desde la Antártida hasta Groenlandia, ofrecen una evidencia interesante, si no es que una prueba incontrovertible. Tal vez las emisiones volcánicas de Siberia desencadenaron en lo alto de la atmósfera reacciones químicas que mermaron la capa de ozono y abrieron una ventana para la radiación ultravioleta mutagénica.

Cualquiera que haya sido la causa, la Gran Mortandad dejó un enorme agujero en la biodiversidad de la Tierra. El planeta tardó treinta millones de años en recuperarse, pero lo consiguió. Y, en un tema que se ha repetido tras todos los eventos de extinción, la pérdida se convirtió en oportunidad. Una nueva era, la Mesozoica, vio cómo evolucionaron nuevas fauna y flora para llenar los nichos vacantes.

¡Dinosaurios!

Un editor muy exitoso me sugirió una vez que si quería vender montones de libros de ciencia tenía que escribir sobre uno de los dos temas más populares: agujeros negros o dinosaurios. (El editor hasta incluyó las palabras «agujeros negros» en el título de uno de mis libros, que no tenía absolutamente nada que ver con agujeros negros).

Así que aquí los tienen. Los dinosaurios aparecieron en escena hace unos 230 millones de años, como beneficiarios de la extinción masiva de finales del Paleozoico. Estos fascinantes reptiles empezaron despacio, pero se diversificaron y radiaron a todos los nichos ecológicos a lo largo de más de 160 millones de años. Tras la Gran Mortandad, los dinosaurios compitieron codo a codo con los grandes anfibios durante un tiempo, pero otro importante evento de extinción hace 205 millones de años, que coincidió con otro megavolcán, barrió con casi todos los demás vertebrados, y le abrió paso a una explosión de dinosaurios.

Los dinosaurios son los miembros más llamativos y carismáticos de la fauna de la era Mesozoica, pero no son los únicos. Los fósiles más comunes de la época son, por mucho, unos cefalópodos marinos de conchas elegantemente enrolladas llamados amonites. Si no hubiera crecido cerca de rocas paleozoicas ricas en trilobites, sino en las tierras mesozoicas de Dakota del Sur, probablemente habría coleccionado amonites. Sus conchas son de una belleza extraordinaria, de simetría espiral y superficies iridiscentes. Estos cefalópodos segmentados, parientes lejanos de los nautilus, exhiben en el caparazón unos adornos exquisitos llamados suturas, que alguna vez separaron cada cámara interior de la siguiente. A diferencia de los trilobites, los caparazones de amonites no pueden ayudarnos a imaginarnos al resto del animal: sus enormes cabezas protuberantes, con grandes ojos y diez tentáculos con ventosas, desaparecieron hace mucho. Lo único que queda es el hogar blindado de una criatura que en realidad era mucho más interesante. Durante 160 millones de años los amonites evolucionaron y se diversificaron en los mares del Mesozoico.

La era Mesozoica también fue testigo de otros avances biológicos importantes. Durante ella aparecieron las primeras

plantas con flores. También los primeros mamíferos verdaderos. Y como ocurrió en cualquier otro lapso importante de la historia de la Tierra, hubo muchos cambios en la geografía y la topografía que acompañaron las novedades en el mundo viviente. Pangea comenzó a fragmentarse y nació el océano Atlántico. Los niveles de oxígeno atmosférico siguieron cayendo, hasta alcanzar un peligroso 15 por ciento, y luego rebotaron nuevamente hasta el nivel actual, de 21 por ciento. Los niveles del mar cayeron y se elevaron una y otra vez, aunque no existen evidencias de ninguna glaciación importante durante el Mesozoico y sin duda ninguna que rivalice con la que dio fin al Paleozoico.

Ahora adelantemos la película hasta llegar a 65 millones de años atrás, a uno de los peores días en la historia de la Tierra. Un asteroide que se calcula debe haber tenido unos 10 kilómetros de diámetro chocó contra la Tierra, cerca de la actual península de Yucatán. El impacto produjo un épico megatsunami que barrió el globo, seguido por enormes incendios que quemaron continentes completos. Los cielos se cubrieron de inmensas nubes de roca evaporada y la fotosíntesis se detuvo prácticamente por completo. Este trauma cósmico parece haber golpeado a un mundo que ya estaba en peligro. Como un eco de la extinción de finales del Paleozoico, es posible que una gran serie de erupciones volcánicas en India llevaran cientos de millones de años modificando la atmósfera de la Tierra y debilitando sus ecosistemas. En otro eco, un descenso importante del nivel del mar parece haber expuesto buena parte de la plataforma continental por aquella época, lo que debe haber trastornado las redes alimentarias del océano y tal vez acabó con las miles de especies de amonites que existían, con excepción de ocho. No resulta obvio cuáles fueron las razones para este cambio en el nivel del mar, porque en esa época no

ocurrió ninguna glaciación. Algunos científicos especulan que las dorsales mesoatlánticas se volvieron menos activas y provocaron un enfriamiento, una contracción y eventualmente un hundimiento de todo el fondo del mar.

Sea cual fuera la causa, individual o grupal, todos los dinosaurios se extinguieron, con excepción de una liga menor: las aves. También murió el último de los amonites. El escenario estaba listo para los mamíferos. Estos pequeños vertebrados parecidos a roedores se habían adaptado cómodamente a la compañía de sus hermanos dinosaurios, más grandes (y que, por lo tanto, estaban condenados a perecer), y su supervivencia a la extinción de fines del Mesozoico les permitió obtener posiciones en casi todos los nichos ecológicos. A diez millones de años del megavolcán indio y del impacto del asteroide que coincidió con éste, los mamíferos se habían diversificado; en 15 millones de años más habían evolucionado los ancestros de las ballenas, los murciélagos, los caballos y los elefantes.

Así fue como las extinciones masivas desafiaron y depuraron la vida en la Tierra. Los últimos 540 millones de años han visto este ciclo una y otra vez. Pero ¿qué pasaba en épocas anteriores? ¿No hubo extinciones masivas hace más de 540 millones de años? Los paleontólogos están perplejos. Antes de la explosión del Cámbrico casi no había fósiles diagnósticos que registrar. Para obtener estadísticas sobre las extinciones se requieren cantidades importantes de organismos característicos, como dinosaurios y trilobites; hace 540 millones de años esos organismos sencillamente no existían. Casi podemos estar seguros de que la vida microbiana experimentó periodos de trauma y de pérdida de especies; debe haber habido impactos de asteroides enormes y episodios de vulcanismo destructivo que esterilizaron grandes extensiones de la superficie terrestre. Sin duda, la vida enfrentó grandes peligros durante los episo-

dios de bola de nieve, tal vez también durante las glaciaciones. Pueden haber ocurrido cientos de extinciones masivas que se remontan al origen mismo de la vida, pero es posible que el registro fósil del Precámbrico, irregular y microscópico, nunca nos lo diga.

La era del hombre

Los humanos no hemos existido durante más de 99.9 por ciento de la historia de la Tierra. No somos más que un pestañeo en la historia de nuestro planeta.

El reciente origen del *Homo sapiens* puede rastrearse hasta unos seres parecidos a los roedores que sobrevivieron al asteroide errante, del tamaño de la isla de Manhattan, que chocó contra el planeta hace 65 millones de años. A unos cuantos millones de años de la desaparición de los dinosaurios los mamíferos habían radiado hacia los nichos ecológicos vacíos, a los campos y las selvas, las montañas y los desiertos, el aire y los océanos. Y sin embargo, los últimos 65 millones de años no han sido fáciles. Muchos de estos mamíferos, extraños y maravillosos, murieron en otras extinciones masivas hace 56, 37 y 34 millones de años, por causas que aún no conocemos.

Los humanos descendemos de los sobrevivientes de la última de esas catástrofes. Los monos, los grandes simios y nosotros tenemos un ancestro común, un primate que vivió hace unos treinta millones de años. Los primeros homínidos, la familia evolutiva que incluye a los primates que caminan erectos, surgió hace tal vez unos ocho millones de años en África central.

Mientras tanto, el resurgimiento en las glaciaciones, que comenzó hace unos veinte millones de años, ha aumentado en intensidad y en frecuencia. Durante los últimos tres millones de años el hielo se ha extendido desde los polos para cubrir grandes franjas de tierra en las zonas altas al menos en unas ocho ocasiones, e incluso ha alcanzado el medio oeste de Estados Unidos. Aunque estas glaciaciones nunca fueron tan extremas como los episodios de la Tierra bola de nieve que los precedieron, cada una estuvo acompañada por un drástico descenso de cientos de metros en el nivel del mar. Se formaron puentes de hielo que unieron Asia y América del Norte y permitieron que toda clase de mamíferos migraran al nuevo mundo, entre ellos mamuts, mastodontes y eventualmente también humanos.

Estas glaciaciones pueden haber conducido a otro sorprendente giro evolutivo. Según una interesante teoría las temperaturas frías favorecen la supervivencia de las crías que permanecen más cerca de sus madres durante largos periodos, así como de las crías con cabezas grandes (mientras más grande es la cabeza, menor es la pérdida de calor). Las cabezas grandes tienen cerebros grandes, y pasar más tiempo con la madre significa que hay más tiempo para aprender. Tal vez no sea una coincidencia que el primer humano, *Homo habilis* u «hombre que fabrica herramientas», apareciera poco después de una de estas grandes glaciaciones, hace 2.5 millones de años.

A lo largo de los miles de años que han transcurrido desde entonces, al grupo humano le ha tocado resistir y adaptarse a los cambios continuos. Al avance del hielo le siguieron periodos «interglaciales» inusualmente templados; a las sequías les siguieron inundaciones; a las grandes retiradas de los mares les siguieron avances igualmente grandes; por suerte la mayor

parte de estos ciclos fue gradual y ocurrió a lo largo de muchas generaciones, así que los humanos nómadas tuvieron mucho tiempo para viajar y para sobrevivir. Estas adaptaciones son uno de los muchos ejemplos recientes de la forma en que la vida responde a los cambios de nuestro planeta.

De hecho, los últimos quinientos millones de años han sido testigos de la más extraordinaria interacción entre la vida y las rocas, una coevolución que sigue furiosamente su curso en la era del hombre tecnológico. Hace eones las rocas, el agua y el aire dieron origen a la vida. La vida, a su vez, fabricó una atmósfera respirable y una tierra verde y segura. La vida convirtió las rocas en suelo que a su vez ha alimentado nueva vida y se ha convertido en hogar de una diversidad siempre creciente de flora y fauna. A lo largo de la historia del planeta el aire, los océanos, los suelos y la tierra han sido modelados por los poderes de transformación de la Tierra: el poder de la luz solar y del calor interno del planeta, la magia del agua, el poder químico del carbono y del oxígeno, la incesante convección de las profundidades y las perturbaciones que ésta provoca en la corteza en forma de terremotos, volcanes y el tránsito incesante de las placas continentales. Nuestra especie, situada en medio de todas estas fuerzas, ha probado ser resistente, astuta y adaptable. Hemos aprendido trucos tecnológicos que nos permiten transformar el mundo a voluntad: extraemos sus metales de las minas y los refinamos, fertilizamos y cultivamos sus suelos, desviamos y explotamos sus ríos, extraemos y quemamos sus combustibles fósiles. Pero nuestros actos tienen consecuencias. Si prestamos atención a los dinámicos procesos que ocurren en nuestro hogar planetario, nos daremos cuenta de que no pasa un día en el que no experimentemos todas las facetas de sus fuerzas creativas interconectadas. Así es como logramos entender lo maleable que puede ser el mundo, lo de-

vastadores que pueden ser sus cambios y lo profundamente indiferente que es a nuestras fugaces aspiraciones.

EDAD DE LA TIERRA (miles de millones de años)

0	1	2	3	4	4-5,6,7
	Eón Hadeano	*Eón Arqueano*	*Eón Proterozoico*	*Eón Fanerozoico*	↑

Capítulo 11

El futuro

Escenas de un planeta cambiante

Edad de la Tierra: los próximos 5000 millones de años

¿El pasado es el prólogo del futuro? Para la Tierra la respuesta es sí y no.

Como ha ocurrido en el pasado, la Tierra seguirá siendo un planeta de incesantes patrones de cambio. El clima se volverá más cálido, luego más frío, una y otra vez. Volverán las glaciaciones, así como épocas de extremos tropicales. La tectónica de placas seguirá llevando y trayendo continentes por todo el planeta, abriendo y cerrando océanos. Los impactos de asteroides gigantes y los megavolcanes volverán a trastornar la vida.

Pero habrá cambios nuevos, muchos de ellos tan irreversibles como la primera corteza de granito. Desaparecerá para siempre un sinnúmero de especies. Todos están condenados: los tigres, los osos polares, las ballenas jorobadas, los pandas, los gorilas. Es muy posible que los humanos también muramos.

Hay muchos detalles de la historia de la Tierra que no conocemos, y que tal vez no podamos conocer. Pero la rica his-

toria de nuestro planeta, de la mano de las leyes naturales, nos da una idea de lo que le espera. Empecemos con el largo plazo y luego acerquémonos más y más a la época moderna.

El final del juego: dentro de cinco mil millones de años

La Tierra se encuentra casi a medio camino de su destrucción inevitable. Durante 4500 millones de años el Sol ha brillado en forma constante y se ha ido haciendo un poco más luminoso a lo largo del tiempo, conforme «quema» su enorme provisión de hidrógeno; y seguirá generando energía nuclear mediante la fusión de hidrógeno en helio durante otros cinco mil millones de años (más o menos). Es lo que hace la mayor parte de las estrellas.

Pero el hidrógeno se agotará, eventualmente. Cuando algunas estrellas más pequeñas alcanzan esta etapa sencillamente se extinguen, se encogen y emiten mucha menos energía que antes. Si el Sol hubiera sido una «enana roja» la Tierra habría estado destinada a convertirse en un cubo de hielo. Si la vida hubiera sobrevivido a pesar de todo, se limitaría a unos cuantos microbios resistentes que vivirían bajo la tierra, allí donde persistiera un poco de agua líquida.

Pero el Sol no va a morir de forma tan lamentable, porque posee suficiente masa para tener un plan nuclear de respaldo. Recuerda que todas las estrellas deben mantener dos fuerzas opuestas en equilibrio. Por un lado, la gravedad jala la masa de la estrella hacia adentro, para hacer una esfera lo más pequeña posible. Por el otro lado, las reacciones nucleares de la estrella, como si se tratara de una secuencia continua de explosiones de bombas de hidrógeno en su interior, empujan hacia afuera y tratan de hacerla más grande. En su majestuosa etapa actual

de quema de hidrógeno el Sol ha alcanzado un diámetro estable de 1 400 000 kilómetros aproximadamente, que es el tamaño que ha tenido durante 4500 millones de años y seguirá teniendo durante cinco mil millones de años más.

Nuestra estrella es lo suficientemente grande como para que cuando la etapa de quema de hidrógeno finalmente termine comience una nueva y frenéticamente energética etapa de quema de helio. El helio, subproducto de las reacciones de fusión del hidrógeno, puede fusionarse con otros átomos de helio para fabricar el elemento carbono, pero esta nueva estrategia solar tendrá consecuencias catastróficas para los planetas interiores. Las reacciones de helio son más energéticas, de modo que el Sol se hinchará más y más, como un globo supercalentado, para convertirse en una palpitante estrella gigante roja. Crecerá más allá de la órbita del pequeño planeta Mercurio y lo devorará por completo. Se hinchará más allá de la órbita de nuestro vecino Venus, y también devorará a nuestro planeta hermano. Crecerá más de cien veces su diámetro actual, más allá, incluso, de la órbita de la Tierra.

Los detalles exactos del fin de la Tierra no son muy claros. Según algunos escenarios pesimistas, el Sol gigante rojo hará que la Tierra se evapore dentro la atmósfera solar, y ahí acabará la cosa. En otros modelos el Sol pierde más de una tercera parte de su masa actual a causa de unos vientos solares inimaginablemente poderosos (que barrerían continuamente la superficie inerte de la Tierra). Cuando el Sol se volviera menos masivo la órbita de la Tierra se alejaría, tal vez lo suficiente como para evitar que el planeta fuera devorado. Pero aunque no alcanzara a aniquilarnos ese Sol en expansión, todo lo que quedaría de nuestro hermoso mundo azul sería un tizón ennegrecido y desértico. Algunos ecosistemas microbianos dispersos podrían perseverar bajo la superficie por otros mil millones

de años, pero la tierra nunca volvería a ser la superficie verde y exuberante que alguna vez fue.

El mundo desierto: dentro de dos mil millones de años

Incluso en su estado actual, en el que quema su hidrógeno tranquilamente, el Sol se está haciendo más caliente muy poquito a poco. Al comienzo, hace 4500 millones de años, el Sol brillaba con 70 por ciento de su luz actual. La Gran Oxidación, hace 2400 millones de años, encontró un Sol que tal vez brillaba con 85 por ciento de su intensidad actual. Y dentro de mil millones de años el Sol será aún más brillante.

Durante un tiempo, tal vez varios cientos de millones de años, los ciclos de retroalimentación de la Tierra pueden haber moderado este cambio. Más calor significa más evaporación, que produce más nubes, que a su vez reflejan más luz solar hacia el espacio. Más calor significa que las rocas se erosionan más rápidamente, lo cual consume más dióxido de carbono, que reduce las cantidades de gases de efecto invernadero. Así que los ciclos de retroalimentación negativa pueden mantener a la Tierra habitable por un largo tiempo.

Pero llegará un punto de quiebre. Marte, que es más pequeño, alcanzó ese momento crítico hace miles de millones de años, cuando se evaporó casi toda el agua de su superficie. Dentro de mil millones de años los océanos de la Tierra habrán comenzado a evaporarse a un ritmo alarmante, y la atmósfera se habrá convertido en una sauna perpetua. No quedarán casquetes polares ni glaciales, pues hasta los polos se convertirán en zonas tropicales. La vida puede seguir prosperando en este ambiente de invernadero por un lapso de muchos millones de años, pero conforme el Sol siga calentándose

y entre más vapor de agua a la atmósfera, el hidrógeno se perderá a tasas cada vez más aceleradas, y el planeta se irá resecando lentamente. Cuando todos los océanos se sequen, tal vez dentro de dos mil millones de años, la superficie de la Tierra será un desierto ardiente y desnudo; la vida estará al borde del precipicio.

Novopangea o Amasia: dentro de 250 millones de años

La destrucción de la Tierra es inevitable, pero falta mucho, mucho, mucho tiempo. Las proyecciones hacia un futuro menos remoto nos muestran la imagen, más benigna, de un planeta dinámico pero relativamente seguro. Si queremos asomarnos a lo que sucederá en unos cuantos cientos de millones de años, el pasado es, en efecto, clave para entender el futuro.

La tectónica de placas seguirá desempeñando un papel central en la transformación de la Tierra. Hoy los continentes se encuentran dispersos; anchos océanos separan América, Eurasia y África, Australia y la Antártida entre sí. Pero estas masas terrestres están en movimiento constante, a ritmos de aproximadamente dos o tres centímetros al año, es decir unos mil kilómetros cada sesenta millones de años. Si estudiamos la edad de los basaltos del fondo oceánico podemos establecer vectores bastante precisos para cada masa terrestre. El basalto que se encuentra cerca de las dorsales mesoceánicas es muy joven, a lo sumo de unos cuantos millones de años de edad. Por el contrario, el basalto de los márgenes continentales y de las zonas de subducción puede tener más de doscientos millones de años de edad. Resulta bastante sencillo tomar las edades de todos estos fondos oceánicos, reproducir la película de la tectónica de placas hacia atrás en el tiempo y obtener un vistazo

de la cambiante geografía continental de la Tierra durante los últimos doscientos millones de años. Con esa información también pueden proyectarse los movimientos de placas más de cien millones de años en el futuro.

Dadas sus trayectorias actuales alrededor del globo, parece que todos los continentes se dirigen hacia otra colisión. Dentro de 250 millones de años (más o menos) casi toda la tierra del planeta formará una vez más un supercontinente, un lugar que algunos geólogos clarividentes ya bautizaron Novopangea. Sin embargo, aún se debate la disposición exacta de esa masa de tierra.

Determinar la forma de Novopangea tiene su maña. Es fácil tomar los movimientos continentales actuales y predecir lo que sucederá dentro de diez o veinte millones de años: el Atlántico se habrá ensanchado varios kilómetros y el Pacífico se habrá encogido otro tanto. Australia se habrá movido hacia el norte, en dirección al sur de Asia, y Antártida se habrá alejado un poquito del Polo Sur, también hacia el sur de Asia. África se dirige lentamente hacia el norte y algún día cerrará el mar Mediterráneo. En unas cuantas decenas de millones de años África habrá chocado con el sur de Europa, y en el proceso habrá cerrado el Mediterráneo y elevado una cordillera montañosa tan grande como los Himalayas que hará que los Alpes, en comparación, se vean diminutos. Así que el mapa del mundo dentro de veinte millones de años nos parecerá familiar, pero algo distorsionado. Llevar a cabo este proceso es más o menos certero para los próximos cien millones de años, y la mayor parte de los modelos arrojan geografías del mundo similares, en las que el océano Atlántico supera al Pacífico como la masa de agua más grande de la Tierra.

Pero a partir de ahí los modelos divergen. Una escuela de pensamiento, llamada extroversión, asume que el Atlántico se-

guirá abriéndose y que el continente americano eventualmente se estrellará contra Asia, Australia y la Antártida. En las últimas etapas del armado de este supercontinente, América del Norte llega desde el este para cerrar el Pacífico y chocar contra Japón, mientras que América del Sur viaja hacia el sureste en el sentido de las manecillas del reloj para envolver la parte ecuatorial de la Antártida. Resulta sorprendente lo bien que todas las partes parecen encajar entre sí. Se calcula que Novopangea será una enorme masa de tierra que se extenderá de este a oeste a lo largo del Ecuador.

La conjetura central del modelo de la extroversión es que las grandes celdas de convección del manto que subyacen a los movimientos de las placas permanecerán más o menos sin cambios. La visión alternativa, llamada introversión, se sitúa en el extremo opuesto al invocar ciclos pasados de apertura y cierre del océano Atlántico. Las reconstrucciones de los últimos mil millones de años sugieren que el Atlántico (o un océano similar ubicado entre América y el oeste de Europa, además de África en el este) se ha abierto y cerrado tres veces en un ciclo de unos cuantos cientos de millones de años, un resultado que sugiere que la convección del manto es variable y episódica. El registro geológico revela que hace 600 millones de años los movimientos de Laurencia y de otros continentes formaron al predecesor del Atlántico, llamado el océano de Jápeto (bautizado así en honor del titán griego Jápeto, padre de Atlas). El océano de Jápeto se cerró cuando se reunió Pangea. Cuando ese supercontinente empezó a romperse hace 175 millones de años se formó el océano Atlántico.

Según los defensores de la introversión (tal vez sea mejor no llamarlos introvertidos), el Atlántico, todavía en expansión, seguirá un patrón idéntico: en unos cien millones de años reducirá su paso, se detendrá y meterá reversa. Luego, unos dos-

cientos millones de años después de eso, América volverá a chocar con Europa y África. Para entonces Australia y la Antártida estarán pegadas al sureste de Asia para terminar de formar el supercontinente «Amasia». Esta gran masa de tierra, con una forma parecida a una L acostada, usa las mismas piezas del rompecabezas de Novopangea, pero ahora con América en el lado occidental.

Por el momento ambos modelos de supercontinentes, la extroversión y la introversión, parecen tener sus propios méritos y siguen en la jugada. Y sin importar el resultado de este amigable debate, todos concuerdan en que la geografía de la Tierra dentro de 250 millones de años será radicalmente diferente de la actual, pero tendrá un eco de los viejos tiempos. El agrupamiento pasajero de los continentes a la altura del Ecuador reducirá el impacto de las glaciaciones y de los cambios moderados en los niveles del mar. Allí donde los continentes choquen se elevarán montañas, cambiarán los patrones del clima y de la vegetación y fluctuarán los niveles atmosféricos de dióxido de carbono y de oxígeno. Estos cambios seguirán siendo centrales para la historia de la Tierra.

Impacto: los próximos cincuenta millones de años

Una encuesta reciente sobre las formas más probables de morir situó los impactos de asteroides en uno de los últimos lugares, algo así como una posibilidad en cien mil. Ésa es más o menos la misma probabilidad estadística de morir a causa de un relámpago o en un tsunami. Pero existe un error evidente en esta predicción comparativa: los relámpagos matan a una persona a la vez unas sesenta veces al año. Los impactos de asteroides, por el contrario, seguramente no han matado a nadie

en miles de años. Pero un mal día, un golpecito cualquiera podría matar a casi toda la gente de una sola vez.

Por suerte existen excelentes probabilidades de que no tengas que preocuparte, ni tú ni nadie durante las próximas cien generaciones. Pero podemos estar totalmente seguros de que un día de éstos, en algún lugar, ocurrirá otro gran impacto, del mismo tipo que el que barrió con los dinosaurios. Durante los próximos cincuenta millones de años la Tierra sufrirá al menos un gran impacto, tal vez más. Todo es cosa de tiempo y de probabilidades. Los sospechosos son los que se conocen como asteroides cercanos a la Tierra, objetos cuyas órbitas, muy elípticas, cruzan el plano de la órbita terrestre, más circular, alrededor del Sol. Se conocen al menos 300 de estos asesinos potenciales, y en las próximas décadas algunos van a pasar incómodamente cerca de nosotros. El 22 de febrero de 1995 un asteroide recién descubierto, que recibió el inofensivo nombre de 1995 CR, pasó zumbando a nuestro lado, a unas cuantas veces la distancia Tierra-Luna. El 29 de septiembre de 2004 el asteroide Tutatis, un objeto alargado de 2.5 por 5 kilómetros, pasó aún más cerca. Y se predice que en 2029 el asteroide Apofis, una roca de más de 250 metros de diámetro, cruzará todavía más cerca, incluso dentro de la órbita de la Luna. Este inquietante encuentro alterará irrevocablemente la órbita de Apofis, y es posible que la acerque aún más en el futuro.

Por cada asteroide cercano a la Tierra que conocemos debe haber docenas más que nos falta divisar. Y cuando finalmente podamos observar uno de estos proyectiles seguramente será demasiado tarde para que hagamos algo al respecto. Si somos su blanco tal vez sólo tengamos unos días de aviso para poner nuestros asuntos en orden. Las estadísticas duras nos cuentan una historia de probabilidades. Cada año la Tierra es golpeada por una roca de unos ocho metros. Gracias al efecto desacele-

rador de nuestra atmósfera la mayor parte de los misiles explotan y se rompen en pedacitos antes de llegar a la superficie. Pero los objetos de treinta metros de largo y mayores, que llegan una vez cada mil años, causan daños locales importantes: en junio de 1908 un impactador de éstos barrió con una franja de bosque cerca del río Tunguska, en Rusia. Cada medio millón de años ocurren impactos de rocas de 800 metros de largo, extraordinariamente peligrosos, y cada diez millones de años nos alcanzan asteroides de cinco kilómetros.

Las consecuencias de un impacto dependen del tamaño del objeto y de su ubicación. Una piedra de quince kilómetros devastaría el globo cayera donde cayera. (En contraste, se calcula que el asteroide que mató a los dinosaurios hace 65 millones de años tenía diez kilómetros de largo). Si un objeto de quince kilómetros cae en los océanos —lo cual tiene una probabilidad de 70 por ciento de suceder, dada la distribución de la tierra y los mares— todo menos los picos más altos de la Tierra será barrido por enormes olas increíblemente destructivas. Nada sobreviviría por debajo de unos cientos de metros sobre el nivel del mar. Todas las ciudades costeras desaparecerían por completo.

Si este asteroide de quince kilómetros golpeara la Tierra, la devastación inmediata estaría más confinada. Todo lo que se encontrara en un radio de 1500 kilómetros se esfumaría, y por el continente que tuviera la mala suerte de ser el blanco avanzarían incendios colosales. Por un breve lapso las tierras más lejanas parecerían haberse salvado de esta violencia, pero el impacto provocaría que se evaporaran inmensas cantidades de roca y tierra que, en forma de nubes opacas en lo alto de la atmósfera, bloquearían la luz del Sol durante un año o más. La fotosíntesis se detendría casi por completo. La vida vegetal se vería devastada, y la cadena alimenticia colapsaría. Algunos

humanos sobrevivirían a este horror, pero la civilización como la conocemos habría llegado a su fin.

Los impactadores más pequeños causarían menos muerte y devastación, pero cualquier asteroide de más de unos cuantos cientos de metros de largo provocaría un desastre natural mayor que cualquiera de los que conocemos, ya sea que cayera en tierra o en el mar. ¿Qué podemos hacer? ¿Deberíamos ignorar esta amenaza por ser demasiado lejana, demasiado insignificante en un mundo que tiene muchos problemas más apremiantes? ¿Qué podríamos hacer para desviar una roca tan grande?

Carl Sagan, tal vez el vocero más carismático e influyente de la ciencia en el último medio siglo, pensó mucho acerca de los asteroides, y propugnó, en público y en privado, y especialmente en su fantástica serie de televisión *Cosmos*, por organizar una acción internacional conjunta. Sagan preparó el camino contando la llamativa historia de los monjes de la catedral de Canterbury, que en el verano de 1178 fueron testigos de una violenta explosión en la Luna, un impacto de asteroide muy cercano a nosotros y que ocurrió hace menos de mil años. Si este impacto ocurriera en la Tierra morirían incontables millones de personas. «La Tierra es un escenario muy pequeño en una vasta arena cósmica», dijo. «Nada indica que nos vaya a llegar ayuda desde algún otro lugar».

El primer paso para evitar un evento como éste, y el más sencillo, es localizar lo mejor que podamos estos esquivos destructores que cruzan nuestra órbita; hay que conocer al enemigo. Necesitamos telescopios dedicados a la tarea, equipados con procesadores digitales automatizados que ubiquen los proyectiles cercanos a la Tierra, que calculen sus órbitas y que predigan sus trayectorias futuras. Esta empresa es relativamente barata, y ya se encuentra en proceso. Hay más cosas

que podrían hacerse, pero al menos se está realizando un primer esfuerzo.

¿Y qué pasaría si encontramos una gran roca y pronosticamos que va a chocar contra la Tierra dentro de unos años? Para Sagan, y para otros en las comunidades tanto científicas como militares, desviar el asteroide es una estrategia evidente. Si se comienza con tiempo suficiente lo único que hace falta es que un cohete o unas cuantas explosiones nucleares bien situadas le den un empujoncito para cambiar su trayectoria de choque apenas lo suficiente para que falle el blanco. Sagan argumentaba que esta necesidad eventual es una razón suficientemente fuerte para establecer un sólido programa de exploración espacial. En un profético ensayo de 1993, Sagan escribió: «Ya que los asteroides y los cometas deben representar un peligro para todos los planetas habitados de la galaxia, los seres inteligentes, si es que existen, tendrán que uniformar políticamente sus mundos, abandonar sus planetas y mudarse a mundos cercanos. Su elección es eventualmente, como en nuestro caso, entre los vuelos espaciales o la extinción».

Los vuelos espaciales o la extinción. Para sobrevivir a largo plazo debemos salir a colonizar mundos vecinos. Primero tendremos bases en la Luna, aunque nuestro brillante satélite seguirá siendo, por mucho tiempo, un lugar hostil para vivir y trabajar. Luego viene Marte, con recursos abundantes y fáciles de obtener, en especial mucha agua subterránea, pero también luz solar, minerales y una atmósfera delgada. Instalarse en Marte no va a ser fácil ni barato, ni está destinado a convertirse pronto en una colonia próspera. Pero asentarnos en nuestro prometedor vecino, y tal vez terraformarlo, bien puede ser el próximo paso esencial en la evolución de nuestra especie.

Existen dos obstáculos evidentes que probablemente retrasen, o incluso eviten, que establezcamos una base marciana.

El primero es el dinero. Diseñar y poner en marcha un aterrizaje en Marte costaría decenas de miles de millones de dólares, fuera de alcance del presupuesto más optimista de la NASA, incluso en las mejores condiciones financieras. La única opción es realizar un esfuerzo de cooperación global, pero nunca se ha intentado llevar a cabo un programa internacional de esas dimensiones.

La supervivencia de los astronautas es un reto igualmente descomunal, porque es casi imposible conseguir que un viaje redondo a Marte resulte seguro. El espacio es un lugar muy hostil, con una infinidad de meteoritos del tamaño de granos de arena que pueden perforar el delgado caparazón de las cápsulas, incluso de las más blindadas, y con erupciones solares que despiden una radiación letal capaz de penetrar cualquier nave. Los astronautas del *Apolo* tuvieron mucha suerte de que nada malo les pasara en sus viajes de una semana a la Luna. Pero un viaje a Marte tomaría muchos meses; cada misión espacial es una apuesta, y más tiempo significa más peligro.

De hecho, no existe todavía ninguna tecnología espacial que le permita a una nave cargar suficiente combustible para llegar a Marte y volver. Algunos inventores dicen que podría procesarse el agua marciana para sintetizar suficiente combustible para recargar los tanques, pero actualmente esa tecnología es sólo un sueño y seguramente tardará mucho en hacerse realidad. Tal vez la opción más lógica —una idea que se opone a los principios de la NASA pero que se promueve cada vez más en apasionados artículos de opinión— es la de un viaje sólo de ida. Si enviáramos una expedición que en vez de combustible llevara años de provisiones, un refugio sólido y un invernadero, semillas, un montón de oxígeno y agua y herramientas para extraer otros recursos vitales del planeta rojo, tal vez tendría una oportunidad. Sería increíblemente peligroso, pero tam-

bién lo fueron muchos de los primeros viajes de descubrimiento humanos, como la circunnavegación de Magallanes de 1519 a 1521, la exploración del Oriente de Lewis y Clark de 1804 a 1806 y las expediciones polares de Peary y Amundsen a principios del siglo XX. Los humanos no hemos perdido nuestras ganas de involucrarnos en aventuras peligrosas. Si la NASA anunciara la oportunidad de emprender un viaje sin regreso a Marte miles de científicos se apuntarían sin pensarlo.

Dentro de cincuenta millones de años la Tierra seguirá siendo un mundo viviente y dinámico; sus océanos azules y sus continentes habrán cambiado un poco pero seguirán siendo reconocibles. El destino de nuestra especie humana es mucho menos seguro. Tal vez estemos extintos. Si es así, 50 millones de años es tiempo más que suficiente para borrar casi todas las huellas de nuestro breve dominio: todas las ciudades, todas las carreteras y todos los monumentos se habrán erosionado hasta desaparecer millones de años antes. Los paleontólogos extraterrestres tendrán que buscar con mucho cuidado para encontrar algún rastro de nuestra especie.

Pero también es posible que los humanos sobrevivan y evolucionen, y que decidan colonizar primero nuestros planetas vecinos, luego nuestras estrellas vecinas. Si es así, si nuestros descendientes consiguen ir al espacio, la Tierra será atesorada como nunca antes, como una reserva natural, como un museo, como un santuario y un lugar de peregrinaje. Tal vez los humanos sólo apreciemos este planeta, el lugar en el que nació nuestra especie, una vez que lo abandonemos.

El mapa cambiante de la Tierra: el próximo millón de años

En muchos sentidos, la Tierra no habrá cambiado gran cosa dentro de un millón de años. Los continentes se habrán movido, claro, pero probablemente no más de unos 50 o 60 kilómetros de sus posiciones relativas actuales. El Sol seguirá brillando, saldrá cada 24 horas y la Luna seguirá orbitando el planeta más o menos cada mes.

Pero algunas cosas habrán cambiado mucho. En varios puntos del globo algunos procesos geológicos inevitables habrán transformado el paisaje. Los cambios más evidentes serán los que afecten las costas. Uno de mis lugares favoritos, Calver County, Maryland, con sus kilómetros y kilómetros de acantilados del Mioceno que se erosionan rápidamente y que contienen un suministro aparentemente ilimitado de fósiles, habrá desaparecido por completo. Después de todo, el condado sólo tiene unos ocho kilómetros de largo y cada año pierde casi treinta centímetros. A ese paso, Calver County no va a durar ni cincuenta mil años, no digamos un millón.

En otros estados los procesos geológicos, por el contrario, añadirán nuevos terrenos valiosos. Cerca de la costa sureste de la isla grande de Hawai un nuevo volcán está creciendo en el fondo oceánico; ya tiene más de tres kilómetros de altura (aunque sigue sumergido) y se eleva más cada año. Dentro de un millón de años habrá emergido entre las aguas una nueva isla, ya bautizada Loihi. Por supuesto, las viejas islas volcánicas del noroeste, entre ellas Maui, Oahu y Kauai se irán haciendo más pequeñas, conforme el viento y las olas hacen su trabajo de erosión.

Hablando de olas, los científicos que estudian el registro geológico en busca de pistas sobre el futuro han llegado a la conclusión de que los avances y los retrocesos de los océanos son las fuerzas que alterarán más dramáticamente la geografía de la Tierra. Los cambios en la tasa de vulcanismo en las dor-

sales oceánicas tienen un efecto de largo plazo, según se solidifiquen volúmenes más grandes o más pequeños de lava sobre el suelo oceánico. El nivel del mar puede desplomarse durante los periodos de calma del vulcanismo oceánico, cuando las rocas del fondo del mar se enfrían y se asientan, y muchos sospechan que esto fue lo que ocurrió durante el dramático descenso en el nivel del mar justo antes de la extinción de finales del Mesozoico. La presencia o ausencia de grandes mares interiores como el Mediterráneo y el ensamblaje y la fractura de los continentes causan cambios enormes en la extensión de las aguas someras de las costas, que a su vez desempeñarán un papel importante en la conformación que tomen la geosfera y la biosfera en el millón de años por venir.

Un millón de años corresponde a decenas de miles de generaciones humanas, cientos de veces toda la historia humana de la que se tiene registro. Si sobrevivimos, tal vez nuestras crecientes proezas tecnológicas transformen la faz de la Tierra en formas que no resulta fácil imaginar. Pero si nos extinguimos es probable que la Tierra permanezca más o menos en su estado actual. La vida en la tierra y en el mar florecerá, y la coevolución de la geosfera y la biosfera pronto volverá a su equilibrio preindustrial.

Megavolcán: los próximos cien mil años

La repentina catástrofe provocada por un impacto de asteroide puede palidecer ante el escenario de un megavolcán o una inundación basáltica, fenómenos que producen una muerte de liberación prolongada. Cada uno de los cinco intervalos de extinción masiva de la Tierra —entre ellos el que ocurrió en la misma época en la que cayó aquella enorme roca del cie-

lo— estuvo acompañado por un vulcanismo capaz de alterar la faz de la Tierra.

No hay que confundirlos con la muerte y la destrucción que provocan los volcanes comunes y corrientes en sus varias presentaciones. Estos últimos arrojan flujos de lava muy dramáticos, parecidos a los que les resultan familiares a los hawaianos que viven en las laderas del Kilauea y que son enormemente destructivos para cualquier cosa que se encuentre en su camino, pero también son localizables, predecibles y fáciles de evitar. En esta liga del vulcanismo común y corriente se encuentran las explosiones y las caídas de ceniza de los volcanes piroclásticos, que pueden liberar cantidades enormes de ceniza incandescente mezclada con vapor que baja por las laderas del volcán a una velocidad de más de ciento cincuenta kilómetros por hora e incinera y sepulta todo lo que encuentra a su paso. Aquí entra la explosión del monte Santa Helena, en el estado de Washington, en 1980, y la explosión del monte Pinatubo, en Filipinas, en junio de 1991, que habrían matado a miles de personas de no ser porque se emitieron alertas que llevaron a realizar evacuaciones masivas. Hay un tercer tipo de vulcanismo corriente que es aún peor: la eyección de grandes cantidades de cenizas finas y de gases tóxicos hacia lo alto de la atmósfera.

Las erupciones de ceniza de los volcanes islandeses Eyjafjallajökull, en abril de 2010, y Grímstvötn, en mayo de 2011, fueron más bien exiguas, pues liberaron mucho menos de un kilómetro cúbico de desechos. Sin embargo, trastornaron durante varios días el transporte aéreo de Europa y provocaron amenazas a la salud para muchas personas que vivían en las regiones cercanas. Se calcula que la erupción de Laki en junio de 1783 —que está entre las mayores erupciones de la historia — liberó veinte kilómetros cúbicos de basalto y de cenizas y

gases asociados, lo suficiente para inducir la formación de una neblina duradera y venenosa sobre Europa. Pereció una cuarta parte de los habitantes de Islandia, algunos en forma rápida a causa de la exposición a los gases volcánicos ácidos y muchos más de hambre durante el invierno que siguió. Este desastre también afectó tierras que se encontraban a más de 1500 kilómetros hacia el sureste, y decenas de miles de europeos, la mayor parte en las islas británicas, también murieron a causa de los duraderos efectos de Laki. Tras la explosión del Krakatoa, en agosto de 1883, y el tsunami que le siguió y que barrió la costas cercanas de Java y Sumatra, murieron todavía más personas. Y la colosal erupción del Tambora, en abril de 1815, que expulsó unos sorprendentes cincuenta kilómetros cúbicos de lava, fue la más mortal de todas. Se perdieron más de 70 mil vidas, la mayor parte como consecuencia de la destrucción de las cosechas y de la hambruna masiva que le siguió. Tambora inyectó a la parte superior de la atmósfera cantidades inmensas de compuestos de azufre que bloquearon la luz del Sol e hicieron que 1816 fuera el «año sin verano» en el hemisferio norte.

Estas erupciones históricas nos parecen perturbadoras, y con justa razón. Por supuesto, la cantidad de muertos palidece en comparación con los cientos de miles de personas que han fallecido a causa de los terremotos recientes en el océano Índico y en Haití. Pero hay una diferencia importante y aterradora entre los terremotos y los volcanes: el tamaño del mayor terremoto posible está limitado por la fuerza de la roca. Las rocas duras sólo pueden tolerar una cantidad limitada de tensión antes de romperse; ese límite extremo puede producir un terremoto extremadamente destructivo pero localizado de magnitud 9 en la escala Richter.

Los volcanes, en contraste, no parecen tener un tamaño límite. De hecho, el registro geológico contiene evidencia inequívoca de erupciones cientos de veces mayores que los eventos volcánicos más grandes registrados en la historia humana. Esos megavolcanes deben haber oscurecido los cielos del planeta durante años y alterado el paisaje a lo largo de millones —y no miles— de kilómetros cuadrados. La explosión más reciente de un megavolcán, Taupo, en la Isla Norte de Nueva Zelanda, hace 26 500 años, puede haber producido más de 800 kilómetros cúbicos de lava y cenizas. Se calcula que Toba, en Sumatra, que hizo erupción hace 74 mil años, expulsó 2800 kilómetros cúbicos de eyecciones. Resulta difícil imaginar qué consecuencias tendría en la sociedad moderna otra catástrofe como ésta.

Y sin embargo, hasta estos megavolcanes, aunque sean mucho mayores que cualquier cataclismo registrado por la historia, no se comparan con las grandes inundaciones basálticas que contribuyeron con las extinciones masivas. A diferencia de las explosiones de los megavolcanes, que se «prenden» o se «apagan», las inundaciones basálticas representan un intervalo continuo de miles de años de intensa actividad volcánica. Los episodios más importantes, todos los cuales coinciden con extinciones globales masivas, produjeron cientos de miles de millones de kilómetros cúbicos de lava. El evento más grande de que se tiene noticia, que hoy conocemos gracias a más de un millón de kilómetros cuadrados de flujos basálticos, ocurrió en Siberia durante la mayor extinción masiva de la Tierra, la Gran Mortandad hace 251 millones de años. La desaparición de los dinosaurios hace 65 millones de años, que con tanta frecuencia se adjudica al impacto de un asteroide, también coincide con inmensas inundaciones basálticas en la India, las trampas de Deccan, que con más de 500 mil kilómetros cua-

drados de superficie representan más de 500 mil kilómetros cúbicos de roca nueva.

Estas vastas características de la superficie no pueden provenir de un simple reprocesamiento de la corteza y del manto superior. Los modelos actuales para describir la formación de las inundaciones basálticas muestran un retroceso a la vieja era de la tectónica vertical en la Tierra, en donde burbujas gigantes de magma que se elevan lentamente desde la frontera supercaliente entre el núcleo y el manto rompen la corteza y se derraman sobre la superficie fría. Actualmente estos eventos son raros. Un escenario propone que existió un intervalo de unos treinta millones de años entre cada episodio de inundaciones basálticas, en cuyo caso ya se ha hecho tarde para que ocurra la siguiente gran avalancha.

Gracias a que vivimos en una sociedad tecnológica es posible que descubramos a tiempo si ocurre otro acontecimiento similar. Los sismólogos serán capaces de rastrear la columna de magma caliente conforme se eleva. Tal vez tengamos cientos de años para prepararnos para esta calamidad, pero si la humanidad entrara a una nueva era de megavulcanismo no habría nada que pudiéramos hacer para detener los paroxismos más violentos de la Tierra.

El factor hielo: los próximos cincuenta mil años

Hasta donde podemos predecir, el factor que determinará en mayor medida los contornos de los continentes de la Tierra será el hielo. En escalas de tiempo cortas, de unos cuantos cientos o miles de años, las profundidades del océano están más estrechamente vinculadas con el volumen total del agua congelada de la Tierra, incluyendo los casquetes polares, los

glaciares y las capas de hielo continentales. Es una fórmula sencilla: mientras mayor sea el volumen de agua encerrado en forma de hielo sobre la tierra, menor será el nivel del mar.

El pasado es un factor clave para predecir el futuro, pero ¿cómo podemos conocer la profundidad de los océanos históricos? Las observaciones satelitales de los niveles del mar, si bien increíblemente precisas, se limitan al último par de décadas. Las mediciones de los niveles de marea, aunque son menos precisas y están sujetas a variaciones locales, se remontan tal vez a un siglo y medio. Los geólogos costeros pueden recurrir a cartografiar los marcadores que indican el perfil de las costas antiguas, por ejemplo terrazas costeras elevadas, de decenas de miles de años, que pueden encontrarse en acumulaciones de sedimentos cerca de las costas, si bien estas formaciones sólo pueden revelar en forma confiable lo que ocurría durante periodos en los que el nivel del agua era alto. La ubicación de corales fósiles, que deben haber crecido en las zonas de los mares someros que recibían luz solar, puede darnos fechas anteriores, pero estas formaciones rocosas suelen experimentar episodios de levantamientos, hundimientos o inclinaciones que tienden a hacer confuso el registro.

Actualmente, muchos científicos se concentran en un indicador menos evidente del nivel del mar: la proporción variable de isótopos del oxígeno atrapados dentro de diminutas conchas marinas. Estas proporciones nos dicen mucho, mucho más que la distancia de un cuerpo cósmico desde el Sol, como discutimos en el capítulo 2. Gracias a su naturaleza sensible a la temperatura, los isótopos del oxígeno también son la clave para descifrar el volumen histórico del hielo de la Tierra y por lo tanto de los antiguos cambios en el nivel del mar.

Aun así, la conexión entre el volumen del hielo y los isótopos del oxígeno puede resultar engañosa. El isótopo del oxí-

geno más abundante, por mucho, es el oxígeno-16, más ligero (con 8 protones y 8 neutrones), que compone el 99.8 por ciento del oxígeno que respiramos. Más o menos uno de cada 500 átomos de oxígeno es oxígeno-18 (más pesado, con 8 protones y 10 neutrones). Eso significa que aproximadamente una de cada 500 moléculas de agua en el océano es más pesada que el promedio. Cuando el Sol calienta los océanos ecuatoriales, el agua con el isótopo oxígeno-16 ligero se evapora un poquito más rápido que la que tiene oxígeno-18, y esto resulta en que el agua en las nubes que se forman a bajas latitudes es, en promedio, un poquito más ligera que los océanos de los que proviene. Conforme las nubes se elevan hacia zonas más frías, el agua con el isótopo oxígeno-18, más pesado, se condensa en forma de gotas de lluvia un poco más rápido que el agua con oxígeno-16, lo que provoca que el oxígeno de la nube se vuelva aún más ligero que antes. Cuando las nubes viajan hacia los polos, lo que todas las nubes hacen inevitablemente, el oxígeno en sus moléculas de agua se ha vuelto mucho más ligero que el del agua del océano. Cuando estas nubes polares liberan su precipitación sobre los casquetes polares y los glaciares, éstos atrapan en el hielo más isótopos ligeros, y los océanos se vuelven un poco más pesados.

Durante épocas de máximo enfriamiento global, cuando puede congelarse más de 5 por ciento del agua de la Tierra, los océanos se enriquecen significativamente de oxígeno-18. En las épocas de calentamiento global y de retirada de los glaciares se reduce el nivel de oxígeno-18 de los océanos. Así, si se mide con cuidado, capa por capa, la proporción de isótopos que existe en los sedimentos costeros se puede saber cómo ha cambiado la cantidad de hielo superficial a lo largo del tiempo.

Ken Miller y sus colegas en la Universidad de Rutgers se dedican precisamente a este exigente trabajo, y llevan décadas

escudriñando las gruesas acumulaciones de sedimentos marinos que cubren la costa de Nueva Jersey. Estos sedimentos, con un registro que se remonta a cien millones de años, contienen una abundancia de conchas fósiles microscópicas llamadas foraminíferos. Cada diminuto foraminífero conserva el contenido de isótopos de oxígeno que tenía el mar cuando éste creció. Así, las mediciones capa por capa de los isótopos de oxígeno en los sedimentos de Nueva Jersey permiten obtener una aproximación sencilla y precisa del volumen de hielo a lo largo del tiempo.

En el pasado geológico reciente la capa de hielo parece haber crecido y menguado constantemente, y como respuesta los niveles del mar han ido cambiando, en una escala temporal de unos cuantos miles de años. En las glaciaciones recientes el hielo alcanzó una altura tal que más de 5 por ciento del agua de la Tierra debe haber quedado atrapada en el hielo, y los niveles del mar deben haber descendido unos cien metros por debajo de su nivel actual. Se cree que hace unos 20 mil años uno de estos periodos de bajo nivel del mar creó un puente de tierra entre Asia y América del Norte, a través de lo que hoy es el estrecho de Bering, el corredor original que usaron los humanos y otros mamíferos para llegar al Nuevo Mundo. Durante el mismo intervalo gélido desapareció el canal de la Mancha, y las Islas Británicas estaban conectadas con Francia mediante un valle desierto. Por el contrario, en época de máximo calentamiento, cuando muchos glaciares desaparecen y los casquetes polares se retraen, los niveles del mar se han elevado una y otra vez hasta cien metros sobre los actuales, sumergiendo cientos de miles de kilómetros cuadrados de zonas costeras del planeta.

Miller y sus colegas han identificado más de cien ciclos de avances y retiradas glaciales en los últimos nueve millones de

años, al menos una docena de los cuales han ocurrido apenas en el último millón de años y que parecen haber alcanzado fluctuaciones de hasta doscientos metros en el nivel del mar. Si bien los detalles pueden variar de ciclo en ciclo, estos eventos claramente son periódicos y tienen relación con los ciclos de Milankovitch, llamados así por el astrofísico serbio Milutin Milankovitch, que los descubrió hace un siglo. Milankovitch se dio cuenta de que las variaciones bien conocidas en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, incluida la inclinación de nuestro planeta, su órbita elíptica y un pequeño bamboleo en su eje de rotación, imponen periodos de cambio climático en intervalos de unos 20, 41 y 100 mil años. Todas estas variaciones afectan la cantidad de luz solar que llega a la Tierra y, por lo tanto, ejercen un profundo efecto en el clima global.

Entonces, ¿qué pasará durante los próximos 50 mil años? Podemos estar seguros de que los niveles del mar seguirán cambiando en forma dramática y tendrán muchas otras subidas y bajadas. En algunos momentos, muy posiblemente durante los próximos 20 mil años, los casquetes polares crecerán, avanzarán los glaciares y el nivel del mar bajará cien metros o más, un nivel que se ha alcanzado al menos ocho veces durante el último millón de años. Este cambio tendrá efectos poderosos en las costas del planeta. La costa este de Estados Unidos crecerá muchos kilómetros hacia el este, conforme quede expuesta la plataforma continental. Todos los grandes puertos de la costa este, desde Boston hasta Miami, se convertirán en ciudades varadas tierra adentro. Un nuevo puente de hielo y de tierra volverá a conectar Alaska con Rusia, y tal vez las Islas Británicas vuelvan a formar parte de Europa. Mientras tanto, las pesquerías más productivas del mundo, que hoy se encuentran a lo largo de las plataformas continentales, se convertirán en tierra firme.

En el caso del nivel del mar, lo que sube tiene que bajar. Es muy posible, algunos dirían muy probable, que durante los próximos miles de años el nivel del mar aumente treinta metros o más. Este aumento en los océanos, bastante modesto según estándares geológicos, volvería irreconocible el mapa de Estados Unidos. Un aumento de treinta metros en el nivel del mar inundaría buena parte de la llanura costera de la costa este y empujaría las costas ciento cincuenta kilómetros hacia el oeste. Todas las grandes ciudades costeras —Boston, Nueva York, Filadelfia, Wilmington, Baltimore, Washington, Charleston, Savannah, Jacksonville, Miami y otras— quedarían sumergidas. Los Ángeles, San Francisco, San Diego y Seattle también desaparecerían bajo las olas. Casi toda la característica península de Florida terminaría ahogada en un mar somero. También casi todo Delaware y Luisiana quedarían bajo las aguas. En otras partes del mundo las consecuencias de un aumento de 30 metros en el nivel del mar serán todavía más devastadoras. Países enteros, como los Países Bajos, Bangladesh y las Maldivas, dejarían de existir.

El registro geológico es inequívoco: estos cambios van a volver a ocurrir. Y si la Tierra se está calentando rápidamente, como supone la mayor parte de los expertos, las aguas subirán muy aprisa, tal vez tanto como 30 centímetros por década. La expansión termal del agua de mar durante los periodos extensos de calentamiento global, por sí misma, puede incrementar el nivel promedio del mar hasta en tres metros. No cabe duda de que estos cambios van a representar un desafío para las sociedades humanas, pero no tendrán mayor efecto en la Tierra.

Después de todo, no sería el fin el mundo. Sólo de *nuestro* mundo.

A casi nadie le interesa demasiado lo que suceda dentro de unos cuantos miles de millones de años, o unos cuantos millones, o incluso unos miles. Casi todos nos preocupamos por problemas más inmediatos: ¿cómo voy a pagar la universidad de mis hijos en diez años? ¿Me van a dar el ascenso el año que viene? ¿Va a subir el mercado de valores la semana que viene? ¿Qué hay de comer?

En ese contexto no tenemos mucho de que preocuparnos. A menos que ocurra un cataclismo imprevisto, el año que viene la Tierra se verá más o menos igual que hoy, y también la década que viene. Cualquier diferencia que exista entre un año y el siguiente probablemente sea demasiado pequeña para que la notemos, aunque experimentemos un verano inusualmente caliente, suframos una sequía que eche a perder las cosechas o nos toque una tormenta más violenta de lo normal.

Lo que es absolutamente seguro es que la Tierra seguirá cambiando. Los indicadores actuales señalan que se aproxima un episodio de calentamiento global y derretimiento de glaciares, casi sin duda influido y acelerado por las actividades humanas. Durante los próximos cientos de años las consecuencias de este calentamiento afectarán a muchas personas de muchos modos distintos.

En el verano de 2007 participé en un simposio de Kavli Future en el lejano Ilulissat, un pueblito pesquero en la costa oeste de Groenlandia, muy cerca del círculo polar Ártico. Fue un buen lugar para discutir el futuro, pues los cambios estaban ocurriendo justo afuera de nuestro centro de convenciones en el cómodo Hotel Ártico. El puerto, que se encuentra cerca del frente del enorme glaciar Ilulissat, ha servido durante mil años

como una próspera zona pesquera. Durante mil años los pescadores recurrieron a la pesca en hielo durante el invierno, pues el puerto se congelaba por completo cada año. Eso fue hasta el nuevo milenio. En 2000, por primera vez (al menos en mil años de historia oral), el puerto quedó abierto y sin congelarse. El enorme glaciar, declarado patrimonio de la Unesco, ha estado retrocediendo a un ritmo sorprendente, casi diez kilómetros en tres años, tras muchas décadas de estabilidad. Otro cambio: durante mil años Ilulissat y los pueblos cercanos han estado libres de insectos molestos, pero en 2007 y en todos los años siguientes el mes de agosto ha venido acompañado por una peste de mosquitos y moscas negras. Es verdad que son datos anecdóticos, pero también son presagios de un cambio enorme e inexorable.

En todo el mundo están ocurriendo cambios similares. Los barqueros de la bahía de Chesapeake reportan mareas consistentemente más altas que hace unas décadas. Año con año el norte del desierto de Sahara avanza aún más hacia el norte y convierte en polvo las que alguna vez fueron fértiles tierras de labranza en Marruecos. Las capas de hielo antártico se están derritiendo y se desprenden a un ritmo cada vez más acelerado. Las temperaturas globales promedio del aire y del agua aumentan. Todo es parte de un patrón consistente de calentamiento, uno que la Tierra ha experimentado incontables veces en el pasado y experimentará incontables veces en el futuro.

El calentamiento puede tener otros efectos, a veces paradójicos. La corriente del Golfo, la gran corriente oceánica que lleva agua templada desde el Ecuador hasta el Atlántico norte, es impulsada por las grandes diferencias de temperatura entre el Ecuador y las latitudes más altas. Si el calentamiento global reduce ese contraste de temperaturas, como sugieren algunos modelos climáticos, la corriente del Golfo puede debilitarse o

incluso detenerse por completo. Irónicamente, una consecuencia inmediata sería que las Islas Británicas y el norte de Europa, cuyo clima es moderado por la corriente del Golfo, se volverían mucho más frías de lo que son hoy. Otras corrientes oceánicas, por ejemplo las que van del océano Índico hasta el Atlántico sur, más allá del cuerno de África, se verían afectadas del mismo modo, y podrían causar un cambio parecido en el benigno clima de África del Sur o un cambio en las lluvias monzónicas que mantienen húmedas y fértiles algunas zonas de Asia.

Conforme el hielo se derrite los océanos suben. Algunas proyecciones alarmantes sugieren incrementos de treinta a sesenta centímetros en el próximo siglo, aunque según el registro geológico reciente de vez en cuando pueden haber ocurrido incrementos aún más rápidos, de muchos centímetros por década. Este cambio oceánico afectará a muchos residentes de las costas en todo el mundo y puede provocarles algunos dolores de cabeza a los ingenieros civiles y a los propietarios de construcciones que dan a las costas, desde Maine hasta Florida, si bien unos pocos metros son un incremento que puede manejarse en la mayor parte de las áreas costeras pobladas. Así que durante un tiempo, una generación o dos, la mayor parte de los residentes de las costas no va a tener que preocuparse demasiado por la invasión del agua de mar.

Pero a algunas especies de plantas y animales no les va a ir tan bien. La pérdida de hielo polar en el norte reducirá el hábitat de los osos polares, un reto más para una población que de por sí parece estar encogiéndose. Un cambio rápido en las zonas climáticas cercanas a los polos también puede ser causa de estrés para muchas otras especies en peligro de extinción, en particular los pájaros, que son especialmente susceptibles a las alteraciones en sus áreas migratorias de anidamiento y ali-

mentación. Un reporte reciente calcula que un aumento global promedio de la temperatura de apenas un par de grados, cómodamente dentro de las predicciones que hacen algunos modelos climáticos para el siguiente siglo, podría desencadenar entre los pájaros tasas de extinción de cerca del 40 por ciento en Europa y más del 70 por ciento en los exuberantes bosques lluviosos del noreste de Australia. Otro preocupante reporte internacional encontró que cerca de una tercera parte de las aproximadamente seis mil especies de ranas, sapos y salamandras se encuentra en un peligro similar, en especial por la diseminación —a causa del calor— de un hongo que provoca una enfermedad mortal en los anfibios. Quién sabe qué más descubramos durante el siglo que viene, pero parece que estamos entrando en una época de extinción acelerada.

Algunos de los eventos transformadores que ocurrirán el siguiente siglo —unos garantizados, otros muy posibles— sucederán en forma instantánea: un gran terremoto, la erupción de un megavolcán o el impacto de un asteroide de un kilómetro de largo. Las sociedades humanas tienden a estar mal preparadas para la tormenta o el terremoto del siglo, y mucho menos para los desastres del milenio, verdaderamente catastróficos. Conforme más leemos la historia de la Tierra más nos damos cuenta de que estos eventos traumáticos son la regla, son inevitables y forman parte del *continuum* de la historia de nuestro planeta. Y sin embargo, construimos nuestras ciudades en las laderas de volcanes activos y sobre algunas de las zonas de falla más activas de la Tierra, con la esperanza de que llegado el momento seamos capaces de esquivar las balas tectónicas (o los misiles cósmicos).

Justo a medio camino entre los procesos muy lentos y los muy veloces se encuentran procesos geológicos fluctuantes que por lo general toman cientos de miles de años: cambios en el

clima, en el nivel del mar y en los ecosistemas que sólo suelen resultar visibles a lo largo de muchas generaciones. Es el *ritmo* de estos cambios, y no los cambios mismos, lo que tiene que preocuparnos, porque el clima, el nivel del mar y los ecosistemas pueden alcanzar puntos de quiebre. Si presionamos demasiado podemos desatar ciclos de retroalimentación positiva, y provocar que lo que normalmente tarda mil años ocurra en el plazo de una o dos décadas.

Es fácil ser complaciente, en especial si decides confiar en una lectura imperfecta de las rocas. Durante un tiempo, hasta 2010, la preocupación por lo que sucede en la actualidad estaba hasta cierto punto mitigada por los estudios, por entonces en curso, de un escenario paralelo hace 56 millones de años, cuando ocurrió una de las extinciones masivas que afectaron dramáticamente la evolución y la propagación temprana de los mamíferos. Este grave acontecimiento, llamado el Máximo Termal del Paleoceno-Eoceno (PETM por sus siglas en inglés), fue testigo de la desaparición, relativamente súbita, de miles de especies. El PETM es importante para nuestro tiempo porque se trata del cambio repentino de temperatura mejor documentado en la historia de la Tierra. Un incremento relativamente rápido en las concentraciones de dióxido de carbono y metano atmosférico —esos gases gemelos de efecto invernadero que atrapan el calor en la atmósfera—, inducido por el vulcanismo de la Tierra, provocó más de mil años de retroalimentaciones positivas y un episodio de calentamiento global modesto. Algunos investigadores pensaron que el PETM era una analogía cercana a los acontecimientos actuales; mala, sin duda —con un aumento de las temperaturas globales de casi 10 grados, un rápido aumento en el nivel del mar, la acidificación de los océanos y el desplazamiento de los ecosistemas hacia los polos

—, pero no tan catastrófica como para amenazar la supervivencia de la mayor parte de los animales y las plantas.

Pero el optimismo no duró mucho: algunos descubrimientos recientes de Lee Kump, un geólogo de Penn State, y de sus colegas, dio al traste con cualquier paralelismo que pudiera hacerse con el PETM. En 2008 el equipo de Kump tuvo acceso a un núcleo de perforación extraído en Noruega que preservaba todo el intervalo del PETM, conformado por rocas sedimentarias que documentaban capa por capa, y con exquisito detalle, las tasas de cambio del dióxido de carbono atmosférico y del clima. La mala noticia es que el PETM —que durante cuatro décadas se pensó que fue la alteración del clima más rápida en la historia de la Tierra— fue desencadenado por cambios atmosféricos de menos de una décima parte de la intensidad de los que ocurren actualmente. Los cambios globales en la composición y la temperatura promedio de la atmósfera, que tomaron más de mil años en ocurrir durante el escenario de extinción del PETM, han sido superados en los últimos cien años, en que los humanos hemos quemado cantidades inmensas de combustibles ricos en carbono.

No existe ningún precedente conocido para un cambio tan rápido, y nadie sabe cómo va a responder la Tierra. En un encuentro de tres mil geoquímicos en Praga, en agosto de 2011, los especialistas en el clima que conocían los nuevos datos del PETM estaban de un humor más bien sombrío. Aunque estos expertos habían tenido cuidado de que sus predicciones públicas fueran cautelosas, los comentarios que escuché mientras nos tomábamos una cerveza eran pesimistas, incluso atemorizantes. Si las concentraciones de gases de efecto invernadero suben demasiado rápido no hay ningún mecanismo conocido que pueda absorber el exceso. ¿El calentamiento puede desencadenar una liberación masiva de metano, con todas las re-

troalimentaciones positivas que entraña ese escenario? ¿El nivel del mar puede elevarse cientos de metros, como lo ha hecho tantas veces en el pasado? Nos aventuramos en *terra incógnita*; estamos llevando a cabo un torpe experimento de escala global que puede ser diferente a todo lo que ha ocurrido hasta ahora en la Tierra.

Lo que revela el testimonio de las rocas es que si bien la vida es muy resiliente y siempre lo será, en los puntos de quiebre, durante los cambios climáticos repentinos, la biosfera experimenta un enorme estrés. La productividad biológica, incluyendo la productividad agrícola, sin duda se desplomará durante un tiempo. En condiciones tan dinámicas los animales grandes como nosotros pagaremos el precio. La coevolución de las rocas y la vida no se verá disminuida, pero no podemos saber cuál será el papel de la humanidad en esta saga de miles de millones de años.

¿Será que ya alcanzamos ese punto de quiebre? Probablemente todavía no, no durante esta década ni durante nuestras vidas. Pero eso es lo malo de los puntos de quiebre: no puedes estar seguro de cuándo van a ocurrir hasta que lo hacen. La burbuja inmobiliaria revienta. El pueblo egipcio se subleva. Los mercados se desploman. Sólo podemos saber qué ocurre en retrospectiva, cuando es demasiado tarde para recuperar el *statu quo*. No es que haya habido una cosa así en la historia de la Tierra.

EPÍLOGO

Los climas cambian, los niveles del mar cambian, las lluvias y los vientos cambian, la distribución de la vida sobre la superficie y dentro de los océanos cambia. Las rocas y la vida siguen coevolucionando, como lo han hecho durante miles de millones de años. Los humanos no pueden detener el cambio global, del mismo modo que no pueden alterar la trayectoria de la Tierra a través del cosmos.

Tampoco podemos destruir la vida en la Tierra ni detener su evolución inexorable. La vida se ha instalado en todos los nichos del planeta. La vida abunda en el hielo del Ártico, en los estanques ácidos e hirvientes, en los poros de rocas que se encuentran a kilómetros de profundidad y en partículas de polvo que viajan por el aire, a kilómetros de altura. Sin importar qué clase de estupidez cometamos —ya sea que causemos que las temperaturas globales aumenten una docena de grados, que envenenemos el aire, o el agua, o diezmemos las poblaciones de peces en los océanos, o incluso que provoquemos un holocausto global con nuestros arsenales nucleares colectivos—, la vida seguirá existiendo. Los humanos pueden desaparecer para siempre, pero la vida microscópica ni se inmutará. En los miles de millones de años por venir, la Tierra seguirá girando en su eje y aún recorrerá su odisea anual alrededor del Sol. Durante miles de millones de años, el nuestro seguirá siendo un planeta viviente de océanos azules, tierras verdes y

remolinos de nubes blancas. Desde el espacio, la Tierra seguirá siendo tan hermosa como lo es hoy, con o sin humanos.

No nos engañemos. No existe ni sombra de duda de que durante el último siglo las actividades humanas han provocado el inicio de cambios dramáticos en la composición de la atmósfera, y que las leyes de la física hacen inevitable que a esto le sigan cambios en el clima. Las concentraciones de dióxido de carbono y de metano, ambos eficientes gases de efecto invernadero, han escalado hasta niveles que no se habían alcanzado durante cientos de millones de años. La rápida deforestación de los bosques lluviosos tropicales, nuestro eficiente consumo de la vida marina y nuestra incesante destrucción de hábitats a lo largo y ancho del globo no hacen más que amplificar estos cambios. Gracias a nuestras acciones, la Tierra va a volverse más caliente, el hielo se va a derretir, los océanos van a elevarse. Pero eso no es nada nuevo para la Tierra. Entonces, ¿por qué debería preocuparnos que las acciones humanas aceleren el proceso de cambio?

Para empezar, imagínate el sufrimiento que padecerá la humanidad en un mundo en el que la vida marina experimente una muerte masiva o de pronto se reduzca a la mitad la producción agrícola. ¿Qué pasaría con los 2.5 millones de kilómetros cuadrados de las mejores tierras agrícolas que se inundarían, los puertos bajo el agua, los medios de subsistencia perdidos? Imagínate el sufrimiento de mil millones de personas desplazadas y sin hogar.

Si decidimos tomar medidas no es para «salvar el planeta». La Tierra ha sobrevivido más de 4500 millones de años de cambio continuo y extravagante, así que no necesita que la salvemos. Algunas personas con disposición filosófica concentrarán sus esfuerzos en salvar a las ballenas o a los osos polares, pues su pérdida sería permanente e innegablemente trágica.

Pero incluso la extinción de estas grandes bestias, o de los elefantes o los pandas o los rinocerontes u otro millón de especies, tanto carismáticas como mundanas, no son para la Tierra más que una pérdida temporal. Es inevitable que en apenas un momento geológico, tal vez no más de un millón de años, evolucionen bestias nuevas y maravillosas que llenen esos nichos vacantes. Los mamíferos grandes como nosotros podemos sufrir extinciones masivas, pero otros vertebrados, tal vez las aves, tomarán nuestro lugar. Tal vez sean los pingüinos que, como se ha demostrado recientemente, evolucionan notablemente rápido; tal vez ellos cambien y experimenten un proceso de radiación evolutiva para llenar esos nichos: pingüinos parecidos a ballenas, a tigres, a caballos. Tal vez los pingüinos desarrollen cerebros grandes y dedos prensiles. No importa lo que hagamos, la Tierra seguirá siendo un mundo viviente y diverso.

No. Si decidimos preocuparnos, debería ser antes que nada por nuestra familia humana, porque somos nosotros los que corremos mayor peligro. La Tierra sabe cómo separar la paja del trigo. La vida perdurará en toda su grandeza, pero la sociedad humana, al menos en su estado actual de despilfarro, puede que no la libre. Los humanos tenemos la capacidad de infligir una cantidad indecible de destrucción y de sufrimiento a los miembros de nuestra propia especie, ya sea mediante nuestras acciones o nuestras inacciones insensatas. Si seguimos alterando nuestro hogar planetario —nuestro «punto azul pálido», como decía Carl Sagan— a un paso más y más rápido, el poco tiempo que nos queda para entrar en acción se nos escurrirá entre las manos.

La Tierra no guarda silencio a este respecto; su historia está ahí, para que la leamos en el pródigo registro de las rocas. Durante miles de años hemos sido lo suficientemente sabios co-

mo para tratar de leer la historia de la Tierra, en un esfuerzo por entender nuestro hogar. Esperemos que aprendamos a tiempo la lección.

AGRADECIMIENTOS

Docenas de amigos y de colegas contribuyeron a concebir y a desarrollar este libro. Estoy especialmente en deuda con cuatro científicos que acogieron la idea de la evolución mineral en 2008, cuando estaba en sus primeras etapas. El mineralogista Robert Downs, un viejo amigo y colaborador, me brindó su vasta experiencia en el tema de la naturaleza y la distribución de los minerales. El petrólogo John Ferry, de la Universidad Johns Hopkins, a quien conozco desde nuestros días de estudiantes de maestría, contribuyó con un sofisticado marco teórico para la nueva aproximación a la mineralogía. El geobiólogo Dominic Papineau, exmiembro posdoctoral del Laboratorio de Geofísica y actualmente académico del Boston College, fue uno de los primeros defensores de la idea de la evolución mineral y uno de sus críticos más perspicaces, a pesar de las objeciones de sus otros mentores de Carnegie. El geoquímico Dimitri Sverjensy de la Universidad Johns Hopkins, mi colega profesional más cercano en los últimos años, aportó una enorme cantidad de ideas al desarrollo conceptual de la evolución mineral. Estos cuatro amigos fueron los primeros partidarios de la idea de la evolución mineral, y todos han sido colaboradores elocuentes y efectivos. Este libro no habría sido posible sin su ayuda.

Aprendimos cosas invaluables del geólogo del precámbrico Wouter Bleaker, de la Geological Survey de Canadá; del ex-

perto en meteoritos Timothy McCoy, de la Smithsonian Institution, y de la autoridad en biomineralogía Hexiong Yang, de la Universidad de Arizona. Ellos nos acompañaron en la publicación inicial de estas ideas. Las colaboraciones posteriores con David Azzolini, Andrey Bekker, David Bish, Rodney Ewing, James Farquhar, Joshua Golden, Andrew Knoll, Melissa McMillan, Jolyon Ralph y John Valley han amplificado el concepto y nos han llevado en direcciones nuevas y emocionantes. Estoy especialmente agradecido con Edward Grew, cuyos estudios sobre la evolución de los minerales de los elementos raros berilio y boro ha llevado el campo a un nuevo nivel cuantitativo.

No podría haber emprendido la escritura de este libro de no ser por mis muchos colegas en el campo de estudio del origen de la vida. Mis agradecimientos especiales para Henderson James Cleaves, George Cody, David Deamer, Charlene Estrada, Caroline Jonsson, Christopher Jonsson, Namhey Lee, Kataryna Klochko, Shohei Ono y Adrian Villegas-Jimenes. También me beneficié enormemente de mis colaboraciones con el paleontólogo de Harvard Andrew Knoll y con varios de sus socios, en particular Charles Kevin Boyce y Nora Noffke, así como Neil Gupta.

Recibí un apoyo infatigable de mis colegas Connie Bertka, Andrea Magnum y Lauren Cyran, del Observatorio de Carbono Profundo, así como de Jesse Ausubel de la Alfred P. Sloan Foundation, que proporcionó un apoyo muy generoso para lanzar este esfuerzo global. A ellos les tocó aguantar mis distracciones mientras trabajaba en este libro. Mis colegas en la Universidad George Mason, en especial Richard Diecchio, Harold Morowitz y Jamez Trefil, entablaron conmigo muchas discusiones estimulantes durante el desarrollo del concepto de la evolución mineral. También estoy agradecido

con Russell Hemley, director del Laboratorio de Geofísica, que me ha ofrecido un apoyo incondicional para la realización de este proyecto.

Muchos científicos me ofrecieron asesoría e información invaluables durante la investigación para este libro. Agradezco a Robert Blankenship, Alan Boss, Jochen Brocks, Donald Canfield, Linda Elkins-Tanton, Erik Hauri, Linda Kah, Lynn Margulis, Ken Miller, Larry Nittler, Peter Olson, John Rogers, Hendrick Schatz, Scott Shepard, Steve Shirey, Roger Summons y Martin van Kranendonk.

Le agradezco a la editorial Viking y al equipo de producción su entusiasmo y su profesionalismo durante el desarrollo de esta obra. Alessandra Lusardi fue su primera defensora y me dio consejos fundamentales durante su fase de desarrollo. Liz Van Hoose me proporcionó una guía editorial invaluable y acompañó el manuscrito hasta su estado definitivo con creatividad, eficiencia y buen humor. También me gustaría agradecer a Bruce Giffords y a Janet Biehl.

La idea original de este libro fue desarrollada en colaboración con Eric Lupfer de William Morris Endeavor, que me ha proporcionado un análisis reflexivo, asesoría oportuna y apoyo constante en cada etapa del proyecto. Estoy en deuda con él.

Margaret Hazen me ayudó durante el desarrollo de la idea de la evolución mineral, desde mucho antes de su primera aparición, el 6 de diciembre de 2006, y hasta la presentación de este volumen. Su ojo de águila y su contagioso entusiasmo en el campo, sus sabios consejos y sus críticas incisivas de todos mis manuscritos, su alegría espontánea y su simpatía en respuesta a los éxitos y a los fracasos de una intensa carrera como investigador han mantenido vivo este esfuerzo.

ROBERT M. HAZEN (Rockville Centre, New York, EE. UU., 1 de noviembre de 1948). Científico principal del Laboratorio Geofísico de la Institución Carnegie y Clarence Robinson, profesor de Ciencias de la Tierra en la Universidad George Mason. Se licenció en geología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, dónde realizó un master y se doctoró en la Harvard Universidad en Ciencias de la Tierra.

Es autor de 400 artículos científicos y 25 libros, incluyendo *Génesis: La búsqueda científica del origen de la vida* y *La historia de la Tierra*. Expresidente de la Mineralogical Society of America, los recientes trabajos de investigación de Hazen se centran en el papel de los minerales en el origen de la vida, la evolución conjunta de la geografía y la biosfera, y la aplicación de «*big data*» para comprender la diversidad y distribución de minerales.

También es Director Ejecutivo del Deep Carbon Observatory, un proyecto a largo plazo para estudiar los roles químicos y biológicos del carbono en el interior de la Tierra. Hazen participa activamente en la presentación de la ciencia para no científicos a través de la escritura, radio, televisión, conferencias públicas y cursos de video. En 2016 Hazen se retiró después de una carrera de 45 años como trompetista sinfónico profesional.

Notas

[1] El ataque a Pearl Harbor (N. de la T.). <<

[2] Día de la Declaración de Independencia de Estados Unidos (N. de la T.). <<

[3] Aunque con frecuencia se atribuyen a los discursos de 2002 de Donald Rumsfeld, estas citas aparecieron por primera vez en el prefacio del libro que escribí con Maxine Singer, *Why aren't black holes black?*, (*¿Por qué no son negros los agujeros negros?*), publicado en 1997. <<

Índice de contenido

Cubierta
La historia de la Tierra
Introducción
Capítulo 1. El nacimiento
- La primera luz
- Nace la química
- Pistas cósmicas
- El sistema solar cobra forma
- Mundos rocosos
- Tiempo profundo

Capítulo 2. El Gran Impacto
- Una Luna extraña
- Arribo a la Luna
- El testimonio de las rocas lunares
- Un cielo diferente
- Mundo lunático

Capítulo 3. La Tierra negra
- Inevitabilidad elemental
- La Tierra fundida
- Las primeras rocas
- El corazón del asunto
- Basalto
- Un mundo hostil

Capítulo 4. La Tierra azul
- El agua: una breve semblanza
- Agua, agua por todos lados
- El ciclo del agua visible

El ciclo del agua profunda
Primer océano
La paradoja del Sol tenue
Capítulo 5. La Tierra gris
Flotabilidad
¿Otra vez un impacto?
Continentes a la deriva
Las montañas ocultas
El mar se expande
El caso de la corteza desaparecida
La revolución
Capítulo 6. La Tierra viva
¿Qué es la vida?
Materia prima
Paso uno: ladrillos y cemento
Paso dos: selección
Derecha e izquierda
Paso tres: replicación
La explosión de la vida
La Tierra viva
Luz
Capítulo 7. La Tierra roja
El testimonio de las rocas
A hacer oxígeno
Más oxígeno
Evidencia fósil
El fósil más pequeño
Los bancos de arena del tiempo
La explosión mineralógica

Capítulo 8. Mil millones de años «aburridos»
Una historia de cambios
El ciclo de los supercontinentes
Larga vida a Columbia
Estasis
Los supercontinentes se repiten: la formación de Rodinia
El océano intermedio
En espera
La explosión mineral
Misterios
Capítulo 9. La Tierra blanca
La ruptura
La Tierra bola de nieve -la Tierra invernadero
Un caso de gases
El Observatorio de Carbono Profundo
Ciclos de cambio
El misterio del hielo
La segunda Gran Oxidación
La invención de los animales
Capítulo 10. La Tierra verde
Todo el mundo es un escenario
¡La explosión animal!
Cambio de facies
La vida en la Tierra
Se inventan las hojas
La tercera Gran Oxidación
La Gran Mortandad y otras extinciones masivas
¡Dinosaurios!

La era del hombre
Capítulo 11. El futuro
El final del juego: dentro de cinco mil millones de años
El mundo desierto: dentro de dos mil millones de años
Novopangea o Amasia: dentro de 250 millones de años
Impacto: los próximos cincuenta millones de años
El mapa cambiante de la Tierra: el próximo millón de años
Megavolcán: los próximos cien mil años
El factor hielo: los próximos cincuenta mil años
Calentamiento: los próximos cien años
Epílogo
Agradecimientos
Sobre el autor
Notas

ÍNDICE

La historia de la Tierra 2
Introducción 7
Capítulo 1. El nacimiento 15
- La primera luz 17
- Nace la química 19
- Pistas cósmicas 23
- El sistema solar cobra forma 33
- Mundos rocosos 37
- Tiempo profundo 39

Capítulo 2. El Gran Impacto 47
- Una Luna extraña 48
- Arribo a la Luna 50
- El testimonio de las rocas lunares 59
- Un cielo diferente 66
- Mundo lunático 69

Capítulo 3. La Tierra negra 74
- Inevitabilidad elemental 77
- La Tierra fundida 83
- Las primeras rocas 87
- El corazón del asunto 92
- Basalto 96
- Un mundo hostil 101

Capítulo 4. La Tierra azul 104
- El agua: una breve semblanza 108

Agua, agua por todos lados 112
El ciclo del agua visible 119
El ciclo del agua profunda 122
Primer océano 126
La paradoja del Sol tenue 133
Capítulo 5. La Tierra gris 136
Flotabilidad 139
¿Otra vez un impacto? 141
Continentes a la deriva 143
Las montañas ocultas 148
El mar se expande 153
El caso de la corteza desaparecida 159
La revolución 165
Capítulo 6. La Tierra viva 169
¿Qué es la vida? 170
Materia prima 173
Paso uno: ladrillos y cemento 175
Paso dos: selección 182
Derecha e izquierda 185
Paso tres: replicación 188
La explosión de la vida 196
La Tierra viva 199
Luz 202
Capítulo 7. La Tierra roja 205
El testimonio de las rocas 206
A hacer oxígeno 211
Más oxígeno 216
Evidencia fósil 218

El fósil más pequeño 223
Los bancos de arena del tiempo 228
La explosión mineralógica 235
Capítulo 8. Mil millones de años «aburridos» 241
Una historia de cambios 243
El ciclo de los supercontinentes 245
Larga vida a Columbia 253
Estasis 256
Los supercontinentes se repiten: la formación de Rodinia 259
El océano intermedio 261
En espera 264
La explosión mineral 266
Misterios 271
Capítulo 9. La Tierra blanca 273
La ruptura 276
La Tierra bola de nieve -la Tierra invernadero 281
Un caso de gases 285
El Observatorio de Carbono Profundo 290
Ciclos de cambio 293
El misterio del hielo 296
La segunda Gran Oxidación 298
La invención de los animales 301
Capítulo 10. La Tierra verde 307
Todo el mundo es un escenario 309
¡La explosión animal! 311
Cambio de facies 316
La vida en la Tierra 320
Se inventan las hojas 325

La tercera Gran Oxidación 328
La Gran Mortandad y otras extinciones masivas 329
¡Dinosaurios! 333
La era del hombre 337
Capítulo 11. El futuro 341
El final del juego: dentro de cinco mil millones de años 342
El mundo desierto: dentro de dos mil millones de años 344
Novopangea o Amasia: dentro de 250 millones de años 345
Impacto: los próximos cincuenta millones de años 348
El mapa cambiante de la Tierra: el próximo millón de años 354
Megavolcán: los próximos cien mil años 356
El factor hielo: los próximos cincuenta mil años 360
Calentamiento: los próximos cien años 366
Epílogo 373
Agradecimientos 377
Sobre el autor 380
Notas 382